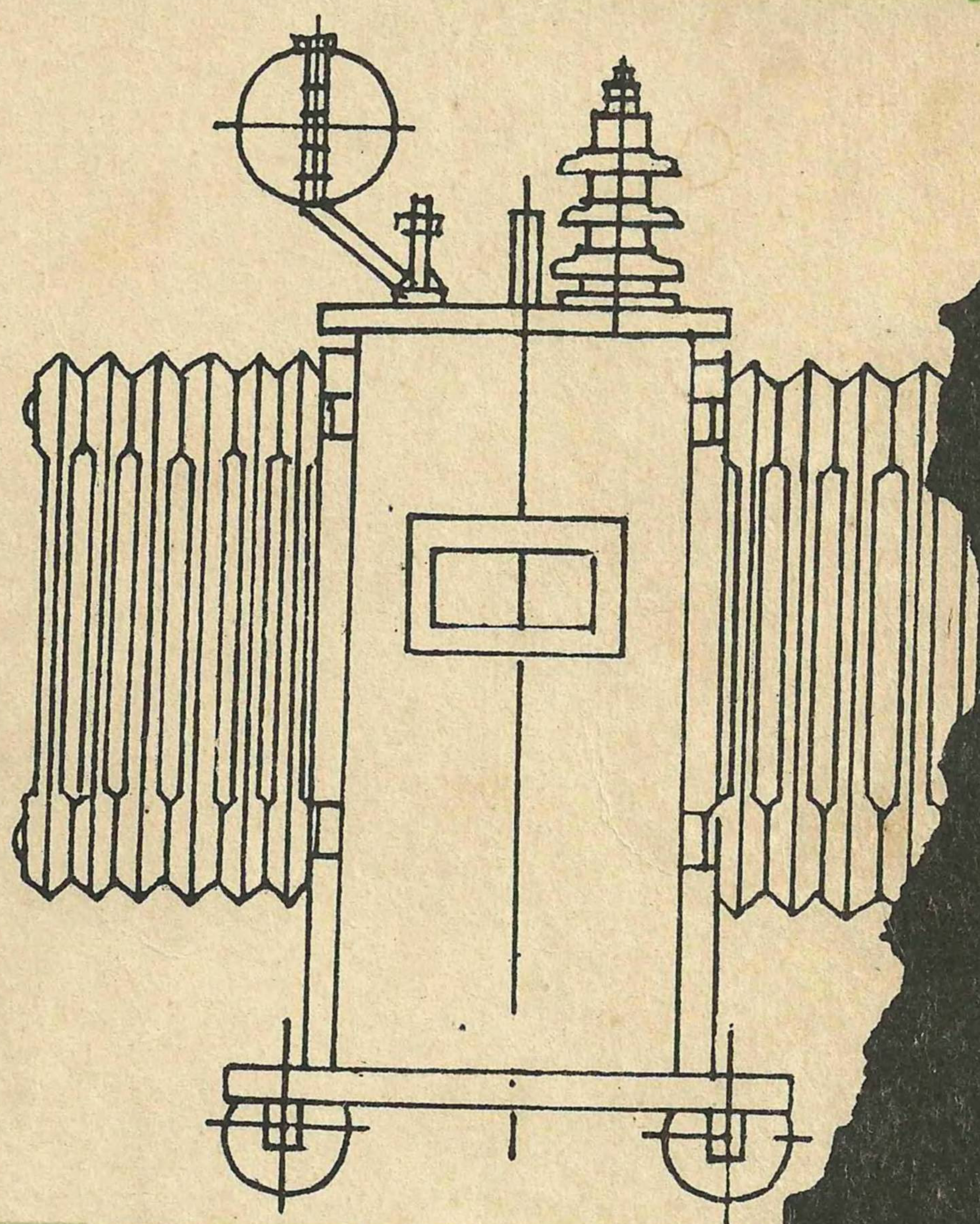
I. CIOC I. VLAD G. CALOTĂ



TRANSFORMATORUL ELECTRIC

CONSTRUCȚIE. TEORIE. PROIECTARE. FABRICARE. EXPLOATARE

SCRISUL ROMÂNESC

Dr. ing. ION CIOC • ing. ION VLAD • ing. GABRIEL CALOTA

TRANSFORMATORUL ELECTRIC

Construcţie. Teorie. Proiectare. Fabricare. Exploatare



SCRISUL ROMÂNESC, CRAIOVA, 1989

Referent științific: Prof. dr. doc. ing. **ANDREI NICOLAIDE**
Coordonarea lucrării: Conf. dr. ing. **ION CIOC**

Coperta: VIOREL PENIȘOARĂ — STEGARU

ISBN 973-38-0021-X

CUPRINSUL

PREFAȚĂ

Lucrarea, așa cum este întocmită, are un caracter deosebit, cuprinzînd aproape tot ce se referă la transformator și anume : construcție, teorie, proiectare, fabricare, întreținere și exploatare. Desigur că o astfel de încercare, fiind după cunoștința noastră și prima de acest fel, poate avea, pe lîngă marele avantaj al spectrului larg de probleme cuprinse, și unele scăpări, pe care autorii și le doresc cît mai mici.

De la început, trebuie făcută precizarea că o tratare în toate detaliile posibile a problemelor enumerate ar fi condus atît la un volum enorm, cît și la o oarecare atenuare a ceea ce este esențial în aceste probleme ; de aceea s-au avut în vedere, mai ales, elementele fundamentale.

Lucrarea conține șase capitole, aranjate în ordinea logică a cunoașterii transformatorului : elemente constructive, principiul de funcționare, calculul și proiectarea, tehnologia de fabricație, instalarea și exploatarea și, în fine, defectele și regimurile anormale mai frecvente ce pot apărea în funcționare, cu indicarea cauzelor și modului de remediere a lor.

Elaborarea lucrării s-a făcut pe baza unui bogat material bibliografic, avîndu-se în vedere, atît standardele și normele existente, cît și elementele de noutate în acest domeniu.

Modul de expunere, exemplele de calcul și gradarea cunoștințelor pe capitole au la bază experiența didactică și de proiectare a autorilor, precum și fructuoasa colaborare cu specialiști experimentați, cu o bogată activitate de proiectare și fabricare a transformatoarelor. În acest sens, autorii aduc calde mulțumiri specialiștilor în proiectarea și fabricarea transformatoarelor din cadrul Institutului de Cercetări și Proiectări și al Întreprinderii Electroputere Craiova, precum și din Întreprinderea de Transformatoare Filiași, pentru contribuția deosebită la ridicarea calității lucrării. De asemenea, autorii mulțumesc tuturor specialiștilor din domeniul exploatării transformatoarelor, al căror bogat material bibliografic a fost de un real ajutor în elaborarea lucrării.

Din modul de concepție al acesteia, reiese cercul larg de specialiști cărora li se adresează lucrarea : muncitori, tehnicieni, maiștri, elevi, studenți și ingineri, atît din domeniul concepției constructive și tehnologice, cît mai ales din domeniul producției și exploatării transformatoarelor.

Sîntem profund recunoscători tovarășului prof. dr. doc. ing. Andrei Nicolaide pentru calda amabilitate și interesul deosebit depus în controlul calității și de prezentare al lucrării.

Mulțumim tuturor celor care, prin sugestii și propuneri, vor contribui la îmbunătățirea, în continuare, a lucrării.

AUTORII

Capitolul 1

ELEMENTELE CONSTRUCTIVE ALE TRANSFORMATOARELOR

Transformatorul electric este un aparat static cu două sau mai multe înfăşurări, cuplate magnetic, cu ajutorul căruia se schimbă valorile mărimilor electrice ale puterii în curent alternativ (tensiunea şi curentul), frecvenţa rămînînd aceeaşi.

Funcţionarea transformatorului are la bază fenomenul de inducţie electromagnetică. Pentru realizarea unui cuplaj magnetic cît mai strîns, înfăşurările sînt aşezate pe un miez feromagnetic. La frecvenţe mai mari de 10 kHz transformatorul se realizează fără miez feromagnetic.

În funcţie de destinaţia lor, în principal, transformatoarele sînt:

— *de putere*, care alimentează anumiţi consumatori sau conectează între ele diferite sisteme energetice (în această categorie se includ şi autotransformatoarele);

— *de măsură*, prin intermediul cărora se pot măsura caracteristicile unui anumit sistem, de înaltă tensiune sau curenţi mari, cu aparatele de măsurat obişnuite, transformatoare care pot fi incluse şi în categoria aparatelor electrice.

Dintre acestea, probleme deosebite ridică transformatoarele de putere şi, în special, cele de puteri şi tensiuni mari, chiar dacă tehnologia de fabricaţie a ambelor categorii este asemănătoare.

Transformatoarele de puteri mici ($S_N < 1$ kVA) au, de regulă, răcire naturală în aer şi se numesc transformatoare uscate. Cele de puteri mai mari au răcire în ulei, deşi în ultimul timp s-au construit şi transformatoare uscate cu puteri de pînă la 1 600 kVA.

Cele mai importante elemente constructive ale transformatoarelor sînt:
— *miezul feromagnetic*;
— *înfăşurările*;
— *schela*;
— *construcţia metalică*;
— *accesoriile*.

1.1. CONSTRUCŢIA MIEZULUI FEROMAGNETIC [1, 2]

Miezul feromagnetic, denumit în unele lucrări prescurtat *miezul magnetic*, reprezintă calea de închidere a fluxului magnetic principal al transformatorului, flux produs de solenaţia de magnetizare a înfăşurării primare care se alimentează de la o tensiune alternativă. Este, aşadar, miez pentru flux variabil, fiind magnetizat ciclic, cu frecvenţa tensiunii de alimentare a înfăşurării primare.

La transformatoarele de putere, utilizate la frecvența industrială, miezul feromagnetic este construit din tole de oțel electrotehnic, aliate cu siliciu și izolate între ele. Utilizarea tolelor conduce la micșorarea pierderilor prin curenți turbionari, iar alierea oțelului cu siliciu asigură pierderi relativ reduse, datorite atît curenților turbionari, cît și fenomenului de histerezis [19].

În etapa actuală, în construcția miezurilor de transformatoare se utilizează frecvent tolele din oțel electrotehnic laminate la rece, cu cristale orientate, izolate cu *carlit* (izolație ceramică), care prezintă o creștere a permeabilității magnetice în direcția laminării și o îngustare a suprafeței ciclului histerezis, în acest fel micșorîndu-se pierderile de magnetizare și puterea specifică de magnetizare (deci și solenația de magnetizare).

Pierderile prin histerezis în cazul cînd liniile de cîmp au direcția paralelă cu direcția de laminare, reprezintă mai puțin de 50% din cele măsurate în situația cînd liniile de cîmp sînt perpendiculare pe aceasta, astfel că, deseori, pierderile în direcții care nu coincid cu direcția de laminare sînt mai mari decît în cazul tablei laminate la cald[1].

Izolația ceramică (carlitul) este o acoperire anorganică a tablei, produsă printr-un tratament de suprafață atît termic, cît și chimic, care protejează tabla, atît împotriva ruginii în timpul stocării, cît și contra oxidării în timpul recoacerii (la cca. 800°C).

Tabla laminată la rece cu cristale orientate își schimbă într-o măsură importantă caracteristicile, ca urmare a modificării structurii cristalografice în timpul tăierii, ștanțării, îndoirii sau lovirii tolelor. De aceea, pentru îmbunătățirea calității tolelor, a fost necesară introducerea operației de *recoacere* a lor chiar la fabricile de transformatoare, înaintea împachetării miezului.

Recoacerea se poate face la miezuri împachetate, la pachete de tole sau, cel mai des, tolă cu tolă. Măsurînd cu aparatul Epstein pierderile specifice la frecvența de 50 Hz și la inducția de 1,5 T după debitarea tolelor de tip *M4* și *M5* de exemplu, se obțin $p_{15} = 1{,}12$ W/kg și respectiv $p_{15} = 1{,}17$ W/kg; după recoacerea tolă cu tolă, la 810°C, a acelorași pachete, se obțin valorile $p_{15} = 0{,}89$ W/kg și, respectiv, $p_{15} = 0{,}97$ W/kg.

Din punct de vedere constructiv, miezul feromagnetic pentru transformatoare se compune din coloanele 1 (*fig. 1.1*), al căror număr depinde de tipul și de numărul de faze ale transformatorului, și jugurile 2, care servesc la închiderea liniilor de cîmp magnetic între coloane.

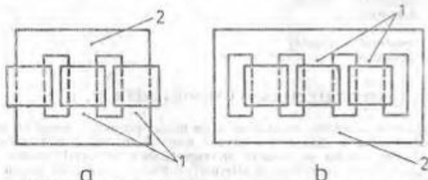


Figura 1.1. Miezuri de transformatoare trifazate: a — cu trei coloane; b — cu cinci coloane.

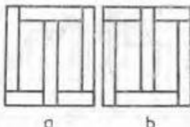


Figura 1.2. Straturi de tole consecutive (alternînd) la un miez feromagnetic pentru un transformator trifazat.

La transformatoarele de putere, jugul superior este astfel construit încît să se poată demonta sau despacheta, pentru introducerea bobinelor.

Există două metode de a executa miezurile : cu îmbinare prin suprapunere și prin întrețesere.

Potrivit primei metode, coloanele și jugurile se execută separat, iar după aceasta miezul se asamblează cu buloane speciale de strîngere. Este necesar ca, în întrefierul de îmbinare care rezultă, să se prevadă garnituri izolate, rezistente la temperatură, cu scopul de a înlătura mărirea curenților turbionari prin scurtcircuitarea tolelor coloanelor de către cele două juguri și invers [5].

Conform metodei a doua (prin întrețesere), o tolă a coloanei alternează cu o tolă a jugului (fig. 1.2), înlăturîndu-se dezavantajul întrefierului net parazit al îmbinării prin suprapunere. Se observă însă că, în zona de îmbinare, liniile de cîmp magnetic, pe anumite porțiuni (hașurate în fig. 1.3 a), au direcția perpendiculară pe cea a orientării cristalelor, ceea ce duce la creșterea pierderilor în fier și a curentului de magnetizare. De aceea, metoda expusă se practică, în special, în cazul tolelor din tablă netexturată (la miezurile transformatoarelor de mică putere, împachetate din tole profil).

Cînd se folosește tabla laminată la rece, la transformatoarele de mare putere la care diametrul cercului circumscris coloanelor depășește 1 m, una din metodele pentru micșorarea pierderilor în colțuri este folosirea construcției în cadre (fig. 1.3 b), caz în care volumul colțurilor în care direcția liniilor de cîmp magnetic nu coincide cu direcția longitudinală de laminare se reduce la jumătate. O atenție deosebită trebuie acordată însă, dimensionării ramelor deoarece, la aceleași solenații de magnetizare, se poate ajunge la saturarea excesivă a ramei interioare, care are o lungime medie a liniei de cîmp mai mică. *

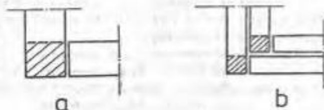


Figura 1.3. Zonele cu pierderi în fier mărite la tabla silicioasă laminată la rece : a — în execuția normală a miezului ; b — în execuția cu cadre.

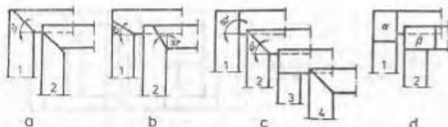


Figura 1.4. Modul de asamblare prin teșire (la colțuri) a tolelor din tablă laminată la rece cu cristale orientate: a — teșire la 45°; b — teșire la 30°; c — teșire la 45°/90°; d — teșire combinată (dreptunghiurile α și β din tablă cu cristale neorientate).

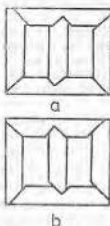


Figura 1.5. Două straturi succesive de tole ale unui miez trifazat asamblat prin țesere la 45°: a — strat par; b — strat impar.

Pentru tolele din tablă laminată la rece cu cristale orientate, asamblarea dintre coloane și juguri se face prin teșirea tolelor cum este indicat în figura 1.4 a...d (pentru colțuri) și în figura 1.5 (pentru un miez trifazat).

Modul de asamblare prin țesere a tolelor texturate are o influență însemnată și asupra curentului de magnetizare. Acest curent este, la un miez asamblat prin țesere sub un unghi de 90°, de circa trei ori mai mare decît în cazul asamblării unui miez prin țesere sub un unghi de 45° [1]. Folosirea buloanelor prin tole laminate la rece cu cristale orientate conduce atît la creșterea pierderilor în fier (prin curenți turbionari și prin devierea liniilor de cîmp magnetic de la direcția de laminare), cît și la mărirea consumului de putere reactivă pentru magnetizare (prin micșorarea secțiunii efective a fierului).

Rezultă deci, că la miezurile asamblate prin țesere din tablă laminată la rece cu cristale orientate, trebuie să se tindă la construcții fără buloane și la o asamblare prin țesere sub un unghi de 45°.

Miezurile feromagnetice ale transformatoarelor se pot clasifica după mai multe criterii.

După forma constructivă a coloanei, se deosebesc:

— miezuri cu secțiunea dreptunghiulară sau pătrată, folosite în special la transformatoarele mici (pînă la 5 kVA);

— miezuri cu secțiunea în trepte (fig. 1.6), urmărindu-se înscrierea secțiunii coloanei într-un cerc, astfel încît coeficientul de umplere cu fier al cercului să fie cît mai mare.

După modul de răcire a miezului, există:

— miezuri compacte — fără canale (fig. 1.6 a);

— miezuri divizate — cu canale (fig. 1.6 b, c), folosite la transformatoare mari, prin canale circulînd uleiul de răcire.

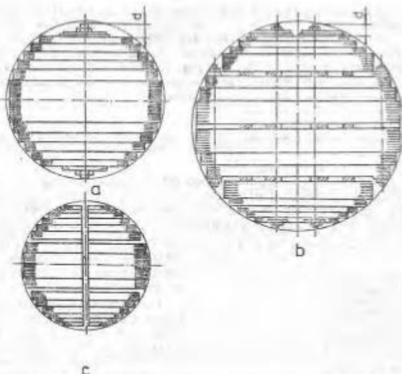
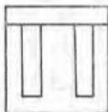


Figura 1.6. Secțiuni prin coloanele miezurilor de transformator : a — fără canale de răcire ; b — cu canale longitudinale ; c — cu două canale longitudinale și un canal transversal.

După forma tolei utilizate, se întîlnesc :
— miezuri împachetate din tole simple (debitate din benzi) ;
— miezuri împachetate din tole profil (fig. 1.7) ;
— miezuri magnetice spiralizate.

La transformatoarele monofazate și bifazate cu miezuri din tole profil, cu puteri sub 3 kVA, tolele corespunzătoare circuitelor magnetice pot avea o mare diversitate de forme. Întreprinderile constructoare de transformatoare



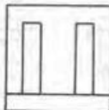


Figura 1.7. Modul de împachetare prin țesere a miezurilor din tole de profil *E* și *I*.

mici au normalizat o parte din aceste forme, în special cele care se decupează fără deșeuri, de tip *U*, *I* și *E*, ca de exemplu în figura 1.8. Decuparea acestor tole fără deșeuri nu se face din tablă texturată, deoarece nu se poate respecta principiul ca direcțiile de magnetizare și cele de laminare să coincidă, atît la coloane, cît și la juguri, ci din tablă silicioasă laminată la rece cu cristale neorientate, folosită de obicei la mașinile electrice rotative.

După numărul de coloane, se deosebesc:

— miezuri cu două coloane;

— miezuri cu trei coloane;

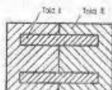
— miezuri cu cinci coloane, întîlnite, de regulă, la transformatorul trifazat în manta;

— miezuri în manta (fig. 1.9).

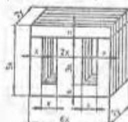
La transformatoarele trifazate, miezurile cu cinci coloane sînt folosite în cazurile cînd utilizarea unui miez cu trei coloane ar duce la o înălțime mai mare a transformatorului. În cazul transformatoarelor de mare putere, transformatoarele cu cinci coloane sînt utilizate pentru a nu se depăși gabaritul de cale ferată. Trecerea de la o construcție cu trei coloane la una cu cinci coloane și aceeași înălțime a miezului, conduce la creșterea puterii cu 25—35%.

La transformatorul cu coloane, fiecare coloană poartă una sau mai multe înfășurări. La acest tip de transformator fluxul magnetic prin jug este egal cu fluxul prin coloane. În scopul micșorării nesimetriei magnetice, la transformatoarele cu trei coloane în plan (cu flux forțat), aria secțiunii jugului este de 1,05 ... 1,15 ori mai mare decît aria secțiunii coloanei.

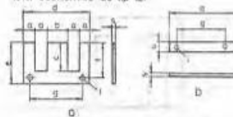
La transformatorul cu miezul în manta, coloanele laterale sînt libere



Plan de tăiere fără pierderi la tola tip EI



Configurația geometrică a tolei economice de tip EI



Tipul de tolă economică EI

Figura 1.8. Tole decupate fără deșeuri pentru transformatoare mici.

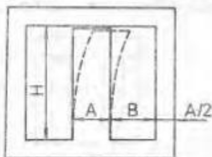


Figura 1.9. Tolă a miezului de transformator monofazat în manta.

şi îndeplinesc rolul unor juguri; ariile secţiunilor jugului şi coloanelor laterale sînt ceva mai mari decît jumătate din aria secţiunii coloanei care poartă înfăşurările.

După felul strîngerii miezului, se întîlnesc:

— miezuri cu strîngere mecanică (cu buloane, cu tije sudate etc.);

— miezuri lipite (cu lac de încleiere).

1.2. CONSTRUCŢIA ÎNFĂŞURĂRILOR [1, 2]

Înfăşurările (a se vedea şi paragraful 3.3.3) constituie una din părţile cele mai importante ale unui transformator. Transformatorul trebuie calculat şi executat astfel încît mărimile sale de bază (pierderile în înfăşurări, tensiunea de scurtcircuit şi încălzirile) să fie în concordanţă cu valorile prescrise de norme. În acelaşi timp, înfăşurările trebuie să asigure transformatorului o rigiditate dielectrică suficientă, precum şi stabilitate dinamică şi termică mare, astfel încît să garanteze buna funcţionare a acestuia şi la supratensiunile care apar în exploatare.

În funcţie de tensiunea şi puterea transformatorului, se determină felul izolaţiei, numărul de spire, curentul şi, deci, secţiunea spirelor.

Experienţa arată că secţiunea unui conductor de cupru nu trebuie să depăşească 60—80 mm² astfel încît, la o densitate de 3—4 A/mm², curentul pentru un conductor să fie de 200—300 A.

În funcţie de sensul de depănare, bobinele pot fi pe dreapta (fig. 1.10 a) sau pe stînga (fig. 1.10 b). Sensul bobinării este esenţial la realizarea grupei de conexiuni cerute de beneficiar. Depănarea unei bobine pe dreapta sau pe stînga se face atunci cînd începe din stînga, respectiv din dreapta şablonului privit din partea tamburului de pe care se desfăşoară sîrma.

Se disting două tipuri principale de înfăşurări: înfăşurări *concentrice* şi înfăşurări *alternate*.

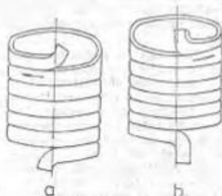


Figura 1.10. Sensul de depănare la bobinele pentru transformator: a — dreapta; b — stînga.

Înfăşurările de tip concentric se caracterizează prin faptul că bobinele de înaltă tensiune s-au scris prescurtat I.T. şi de joasă tensiune, sau scris prescurtat J.T., au înălţimi aproximativ egale. Înfăşurarea de înaltă tensiune avînd, în mod obişnuit, diametrul mai mare, deoarece este aşezată peste cea de joasă tensiune, iar înfăşurarea de joasă tensiune diametrul mai mic şi aşezată în imediata

apropiere a coloanei miezului feromagnetic, ca în figura 1.11 a şi figura 3.7.

În cazul înfăşurărilor de tip alternat, diametrele bobinelor de I.T. şi de J.T. sînt egale; în schimb, pe înălţimea coloanei transformatorului, bobinele de I.T. alternează cu cele de J.T. ca în figura 1.11 b.

Aproape în exclusivitate se folosesc înfăşurările de tip concentric, cele alternate utilizîndu-se la unele transformatoare speciale.

Combinaţia dintre înfăşurarea de tip alternat şi miezul în manta, care formează transformatoare de tip blindat, se vede în figura 1.11 c.

După forma constructivă, înfăşurările pot fi: *cilindrice*, *stratificate*, *în galeţi*, *continue* şi *spiralate*.

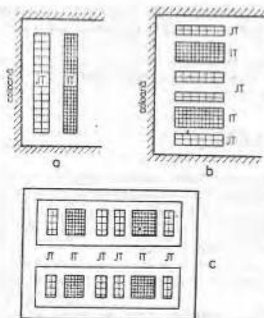


Figura 1.11. Tipurile principale de înfăşurări: a — tip concentric; b — tip alternat; c — tip blindat cu miez în manta şi înfăşurări alternate (la un transformator monofazat).

1.2.1. ÎNFĂŞURĂRILE CILINDRICE

Înfăşurarea cilindrică (v. fig. 3.10) reprezintă o spirală cilindrică, ale cărei conductoare au secţiunea dreptunghiulară şi sînt în contact strîns. Aceste bobine sînt utilizate, de obicei, în transformatoarele de puteri şi tensiuni mici (pînă la 1 600 kVA şi 700 V). La capetele bobinei se utilizează egalizatori de capăt din pertinax sau transformerboard (trafoboard). Grosimea egalizatorului de capăt este aproximativ egală cu grosimea fiecărui strat.

Bobinarea se poate face pe lat (în majoritatea cazurilor) sau pe cant, atunci cînd latura mică a conductorului este paralelă cu axa longitudinală a bobinei. În acest din urmă caz apar pierderi suplimentare, datorită refulării curentului, mai mari.

În cazul înfăşurării cu mai multe conductoare în paralel, suprapuse radial, pentru uniformizarea repartiţiei curentului din conductoarele în paralel, acestea trebuie să fie transpuse (fig. 1.12).

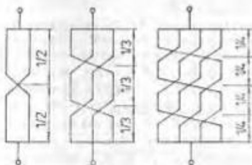


Figura 1.12. Schemele de transpunere a conductoarelor în paralel.

Numărul total de transpuneri în cazul a „m" conductoare în paralel suprapuse radial, înfăşurate pe lat, este de „m — 1". Realizarea transpoziţiei are următoarele efecte:

— fiecare dintre conductoarele în paralel ocupă în cîmpul de scăpări aceeaşi poziţie rezultantă;

— fiecare conductor are o aceeaşi lungime;

— egalitatea reactanţelor şi a rezistenţelor firelor în paralel (consecinţa primelor două), ceea ce împiedică apariţia curentului de circulaţie dintre fire.

Un caz particular al înfăşurării cilindrice îl constituie înfăşurarea în folie, care este utilizată la transformatoare cu puteri pînă la 2 500 kVA şi tensiuni pînă la 10—15 kV. Se utilizează, în special, folia de aluminiu cu grosimi de la 0,025 mm la 2 mm (STAS 5681-74). Înfăşurările din folie se pot realiza monobloc, lăţimea foliei fiind egală cu înălţimea totală a înfăşurării, sau din galeţi cu înălţime egală cu lăţimea foliei.

Un mare avantaj al foliei de aluminiu este faptul că forţele axiale la scurtcircuit faţă de o bobină, de aceeaşi înălţime, din conductor profilat, scad de aproximativ 10 ori [13].

Folosirea foliei de aluminiu în locul conductorului profilat clasic presupune şi alte avantaje constructive:

— poate fi laminată în table cu grosime constantă garantată, cu suprafaţă netedă şi lucioasă;

— factorul de umplere al benzii de aluminiu la înfăşurarea de joasă tensiune — tipul cilindric — este mai bun;

— bobinele din folie de aluminiu conduc la o bună răcire, transmiterea căldurii făcîndu-se simetric faţă de axa secţiunii longitudinale;

— solicitările izolaţiei dintre spire sînt mici în comparaţie cu bobina clasică, deoarece între două straturi apare numai tensiunea pe spiră şi, în acelaşi timp, cuplajul puternic capacitiv dintre spire serveşte unei distribuţii aproximativ liniare a undei de impuls, pe lungimea înfăşurării.

1.2.2. ÎNFĂŞURĂRILE STRATIFICATE

Înfăşurările stratificate sînt utilizate, de obicei, la transformatoarele de putere cu tensiuni peste 1 kV (unele fabrici constructoare le execută şi la tensiuni de 110 kV sau mai mari) şi se realizează din conductoare rotunde, cu diametrul pînă la 3—3,5 mm, sau din conductoare profilate cu secţiuni pînă la 30 mm². Acestea sînt înfăşurate pe un cilindru izolant în straturi, în mod continuu (direct sau pe pene).

Avantajele înfăşurărilor stratificate constau în execuţie uşoară, cu mare productivitate, posibilităţi de răcire mai bune, bună rezistenţă la impuls de tensiune (înfăşurările stratificate se apropie, din punct de vedere al comportării la impuls, de cele antirezonante). Ecranările interioară şi exterioară ale acestor înfăşurări le fac complet antirezonante.

Un dezavantaj al acestor tipuri de înfăşurări îl constituie tensiunea mare dintre straturi, care impune folosirea, între straturi, a unor izolaţii de hîrtie mai groase, proporţionale cu tensiunea la care sînt folosite (fig. 1.13).

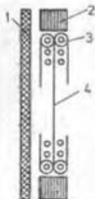


Figura 1.13. Înfăşurare de tip stratificat: 1 — cilindru izolant; 2 — inele izolante de sprijin; 3 — izolaţii ale spirelor de capăt; 4 — izolaţii între straturi.

1.2.3. ÎNFĂŞURĂRILE ÎN GALEŢI

Înfăşurările de I.T. (pînă la 60 kV), realizate cu spire multe şi conductoare de secţiune mică, se divizează pe lungime într-o serie de bobine mai mici, numite *galeţi*, separate prin canale cu distanţori sau inele izolante. Numărul de galeţi în care se divizează înfăşurarea se determină din considerente de tensiune (din acest punct de vedere prezentînd avantaj faţă de înfăşurările stratificate), de răcire şi, uneori, de rezistenţă mecanică.

Înfăşurările în galeţi se realizează din conductori rotunzi, cu diametre cuprinse între 0,5 şi 3 mm şi/sau din conductori profilaţi de secţiune mică (de la 8 la 16 mm²). Modul de legare a galeţilor şi tensiunea dintre ei U_{ig} sînt indicate în figura 1.14 a, cînd galeţii se aşază normal, sau în figura 1.14 b, cînd fiecare al doilea galet trebuie întors.

Folosind un conductor profilat de secţiune nu prea mare, se pot realiza, de asemenea, galeţi din mai multe straturi, în mod similar cu cei din conductor rotund. Un galet tipic pentru sîrma profilată este galetul plan dublu (jumelat), reprezentat în figura 1.15.

Într-un galet dublu, ca şi la înfăşurările spiralate, fiecare conductor este în contact cu uleiul cel puţin pe două laturi (laturile mici). Galeţii dubli pot fi depănaţi cu un singur conductor sau cu cîteva conductoare în paralel. În acest din urmă caz, la trecerea de la un galet la altul, trebuie executată transpoziţia. Galeţii dubli pot fi folosiţi atît pentru înfăşurările de înaltă tensiune, (transformatoare de putere mai mare), cît şi pentru cele de joasă tensiune, galeţii fiind legaţi în paralel sau în serie. În figura 1.16 sînt reprezentate legările galeţilor dubli în paralel şi în serie.

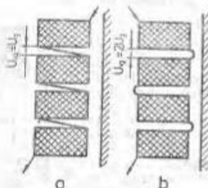


Figura 1.14. Metode de legare a galeţilor: a — galeţi neîntorşi; b — fiecare al doilea galet întors.

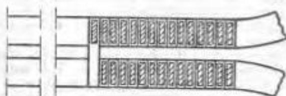


Figura 1.15. Galetul plan dublu (jumelat).

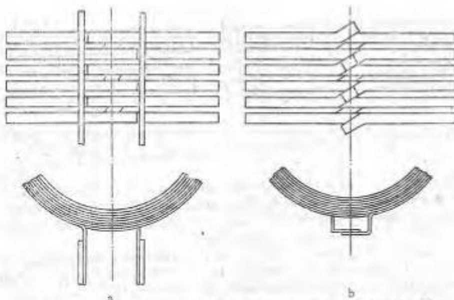


Figura 1.16. Legarea galeților dubli (jumelați): a — în paralel; b — în serie.

1.2.4. ÎNFĂŞURĂRILE CONTINUE

Înfăşurările continue se fabrică sub formă de galeți înseriați fără lipituri, motiv pentru care poartă această denumire. Se execută din conductori de formă dreptunghiulară şi sînt specifice tensiunilor ridicate, peste 3 kV. O secțiune prin înfăşurarea continuă cu n_g galeți, a cîte w_g spire fiecare, este reprezentată în figura 1.17 (v. şi fig. 3.20).

Modul de realizare a unei înfăşurări continue, în galeți, este prezentat în paragraful 3.3.3 C şi figura 3.19.

Galeții sînt separați între ei fie prin rondele de preşpan, fie, cel mai frecvent, prin canale în care circulă uleiul, realizate cu distanțoare aşezate uniform pe periferia galetului (v. fig. 3.20).

Un caz particular îl constituie *înfăşurările continue de tip întrețesut*, adică avînd spirele intercalate, ceea ce conduce la o creştere a capacității longitudinale, fără a recurge la ecrane capacitive speciale. La înfăşurările de înaltă tensiune şi anume peste 110 kV tensiune nominală, pentru reducerea solicitărilor la impuls de tensiune, în bobinele continue se utilizează tipuri speciale

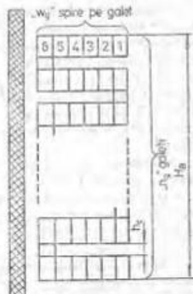


Figura 1.17. Înfăşurare de tip continuu

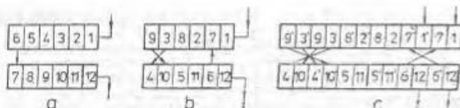


Figura 1.18. Tipuri de bobine întrețesute: a — grupă de doi galeți normali; b — grupă de doi galeți întrețesuți după tipul English Electric; c — grupă de doi galeți cu două fire în paralel și întrețesuți după tipul Savoisienne.

de întrețesere, care au ca efect creșterea capacității serie a bobinei în comparație cu capacitatea spre masă, ceea ce conduce la uniformitatea distribuției inițiale a tensiunii de impuls, deci la micșorarea solicitărilor datorate acestei distribuții din zona de intrare a înfășurării.

În figura 1.18 sînt arătate două tipuri de întrețesere mai utilizate, în comparație cu bobina continuă normală. În figura 1.18 a, este arătată o grupă de doi galeți de bobină continuă normală, iar în figura 1.18 b, o aceeași grupă de doi galeți, însă cu spirele întrețesute. În cazul bobinelor continue cu două conductoare în paralel, întrețeserea se realizează după metoda Savoisienne, indicată în figura 1.18 c.

1.2.5. ÎNFĂȘURĂRILE SPIRALATE

Înfășurările de joasă tensiune ale transformatoarelor de putere medie și mare au nevoie de spire puține și de secțiune mare a conductoarelor, necesitînd un număr de conductoare în paralel mai mare decît șase. În aceste condiții, bobina spiralată este o bobină cilindrică la care spirele nu sînt în contact strîns, ci distanțate, iar conductoarele în paralel sînt suprapuse radial. O secțiune printr-o astfel de bobină va arăta identic cu bobina continuă (fig. 1.17) cu deosebirea că, în loc de w_g spire pe galet, se înțeleg $m = w_g$ conductoare în paralel pe spiră un galet fiind deci constituit dintr-o singură spiră.

Înfășurarea spiralată este tipică pentru transformatoare cu curenți de fază mai mari de 1 000 A, fiind folosită atît la tensiuni joase (sub 1 kV), cît și la tensiuni medii (pînă la 35 kV). În cazul în care numărul de conductoare în paralel devine foarte mare, acestea se împart în două, plasîndu-se pe doi galeți paraleli și bobinîndu-se deodată. O astfel de înfășurare se numește *înfășurare dublu spiralată*.

Conductoarele în paralel din care se compune spira sînt izolate, îndoite pe lat și suprapuse radial, unul peste celălalt, cum se arată schematic în figura 1.19, în care s-au considerat 8 conductoare în paralel. În acest caz însă,

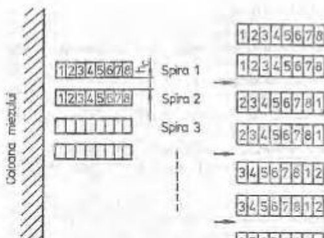


Figura 1.19. Schema înfăşurării spiralate cu 8 conductoare în paralel.

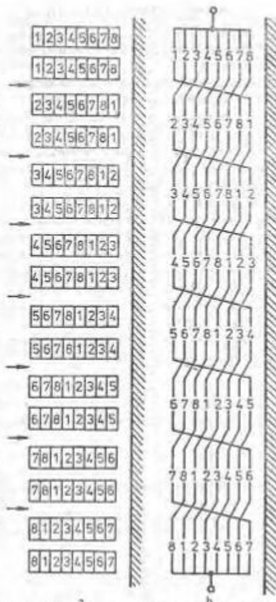


Figura 1.20. Înfăşurare spiralată compusă din 16 spire cu 8 conductoare în paralel suprapuse radial: a — secţiune prin înfăşurare (săgeţile indică locul de transpunere); b — schema transpunerilor.

după cum se observă, între cele 8 conductoare se creează diferenţe de tensiune şi deci curenţi de circulaţie, care provoacă neajunsuri în funcţionarea transformatorului prin mărirea pierderilor suplimentare, deşi sînt ai aceluiaşi conductor real. Se impune, deci, pentru egalizarea parametrilor firelor în paralel, *transpoziţia* acestora, adică schimbarea poziţiei firelor în paralel.

Pentru exemplificare, se consideră că o înfăşurare cu 8 conductoare elementare în paralel, suprapuse radial, are un total de 16 spire. Rezultă că fiecare conducter trebuie să ocupe aceeaşi poziţie în spiră pe o înălţime din coloană corespunzătoare unui număr de $16/8 = 2$ spire. Acest lucru se realizează efectuîndu-se, la fiecare două spire, o transpunere a conductoarelor, aşa cum se arată în figura 1.20, din care reies şi poziţiile ocupate de fiecare conductor elementar. Modul de realizare a transpoziţiei pentru şase conductoare în paralel, suprapuse radial, este indicat în figura 3.16.

1.3. CONSTRUCȚIA SCHELEI [1, 3]

Prin schelă se înțelege ansamblul construcției care îndeplinește următoarele roluri :

— stringerea jugurilor miezului magnetic ;

— consolidarea axială a înfășurărilor ;

— consolidarea conexiunilor dintre înfășurări, a celor de la comutatorul de reglaj și de la izolatoarele de trecere ;

— ridicarea întregii *părți decuvabile* a transformatorului (ansamblul care se introduce în cuvă) în cazurile în care, datorită masei mari, aceasta nu poate fi ridicată de pe capac.

În figura 1.21 este reprezentată schela unui transformator, care cuprinde următoarele elemente : 1) profiluri de oțel (denumite și console) pentru stringerea jugurilor ; 2) profiluri de oțel cu secțiune mai mică, care servesc la sprijinirea părții decuvabile de fundul cuvei (în partea inferioară) și la adaptarea tiranților de suspensie (în partea superioară) ; 3) tiranți fixați între console, care servesc la stringerea axială a înfășurărilor ; 4) tiranții de suspensie, care servesc la fixarea schelei de capac și la ridicarea părții decuvabile.

Această construcție a schelei este adoptată, în general, la transformatoarele cu puteri de pînă la 5 000 kVA. La puteri mai mari se folosește un alt sistem constructiv, în care transformatorul se reazimă pe fundul cuvei.

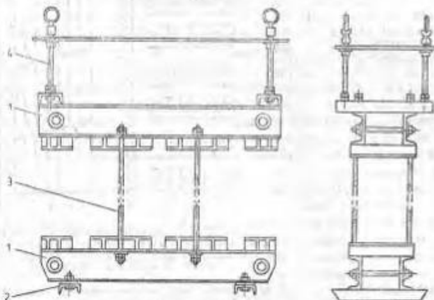


Fig. 1.21 Schela unui transformator : 1 — console; 2 — elemente de sprijin pe fundul cuvei ; 3 — tiranți ; 4 — tiranți de suspensie.

Pentru a permite stringerea înfășurărilor după uscare, consola superioară are orificii ovale, prin care trec buloanele de stringere a jugului. Aceste orificii permit, după uscarea transformatorului, coborîrea nivelului la care sînt fixate consolele superioare și presarea înfășurărilor cu tiranții.

Stringerea jugului se mai poate realiza și cu ajutorul unor benzi de poliglas, terminate la capete cu elemente metalice, care string jugurile peste console, în spațiul dintre coloane.

Elementele de presare ale bobinelor sînt piese metalice sudate de console și filetate, prin care trec șuruburi speciale care presează inele fie metalice, avînd legătură de împămîntare și întrerupte pentru a nu constitui spire în scurtcircuit, fie confecționate din material electroizolant gros, inele prevăzute la capătul superior al bobinei. Presarea adecvată a bobinelor transformatorului constituie una din problemele constructive principale. O bună presare a bobinelor trebuie să garanteze imobilitatea acestora în cazul unor scurtcircuite în rețea, în timpul cărora, datorită intensității mari de curent care străbate spirele bobinelor, apar forțe electrodinamice mari.

Presarea bobinelor se poate realiza prin inele de presare comune pentru toate bobinele unei faze sau prin intermediul unor inele de presare separate.

Prima variantă garantează așezarea corespunzătoare a buloanelor pe inelul de presare, care este destul de lat, practica arătînd că în cazul cînd se aplică o presiune mare în timpul stringerii înfășurărilor în faza finală a montajului, precum și după egalizarea lor la stringerea preliminară (fiecare înfășurare separat), metoda de mai sus asigură simplitate și siguranță. Dezavantajul este că, în cazul tasărilor inegale ale izolațiilor longitudinale ale bobinelor, unele dintre acestea pot să rămînă nepresate, deci să oscileze cu frecvența care apare în cazul scurtcircuitului.

Presarea prin inele separate asigură o rezistență mare a înfășurărilor la forțele electrodinamice, astfel că această metodă poate fi aplicată la transformatoarele cele mai expuse la supracurenți (transformatoare pentru redresoare, de încercare la scurtcircuit etc.).

1.4. CONSTRUCȚIA METALICĂ [1, 2, 3]

Construcția metalică se execută numai pentru transformatoarele cu răcire în ulei și se referă la *cuvă*, *capac* și *conservator*.

1.4.1. CONSTRUCȚIA CUVEI

În funcție de mărimea transformatorului, cuvele din tablă de oțel pot fi: cu pereți netezi, cu pereți ondulați, cu țevi sudate, cu fire din țevi, cu radiatoare cu țevi eliptice sau cu panouri și cu baterii de răcire suflate cu aer sau răcite cu apă.

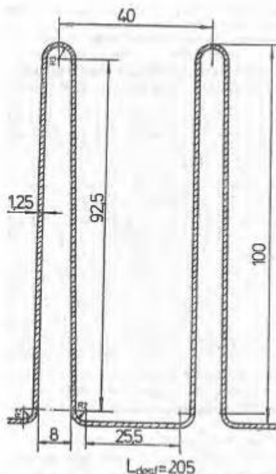


Figura 1.22. Formă de ondulă utilizată la cuvele transformatoarelor (dimensiunile sînt în mm).

Pentru transformatoarele foarte mici (cu puteri pînă la 20 kVA), la care nu este necesară suprafaţă de răcire suplimentară, cuvele sînt de tip neted.

Cuvele cu pereţi din tablă ondulată sînt utilizate la transformatoarele în ulei cu puteri de la 20 kVA la 1 600 kVA, în limitele posibilităţilor de cedare către mediul ambiant a pierderilor din transformator (fig. 1.22), avînd o rezistenţă relativ mică la creşterea presiunii interioare. Din acest motiv, uscarea sub vid a transformatorului în cuvă din tablă cu ondule nu este posibilă.

Cuvele cu ţevi rotunde sau ovale sînt utilizate la transformatoarele cu puteri de la 25 kVA la 10 MVA. Acestea au o rezistenţă mecanică mai mare decît cele realizate din tablă ondulată şi, la aceeaşi cantitate de ulei, au aria suprafeţelor de răcire mai mare.

Date orientative privind grosimile tablelor din care se realizează pereţii, fundul şi capacul cuvei, se dau în tabelul 1.1.

TABELUL 1.1

Date cu privire la cuvele cu ţevi

S_N [kVA]	Număr rînduri ţevi	Grosimea [mm]		
		perete	fund	capac
20–50	1	1,5–2,0	3	4–5
75–200	1–2	2,0–2,5	3–4	5–6
250–500	3–4	2,5–3,5	4–5	6–8
630–1 000	4–5	3,0–4,0	5–6	10
>1 000	5–6	4,0–5,0	8–10	12

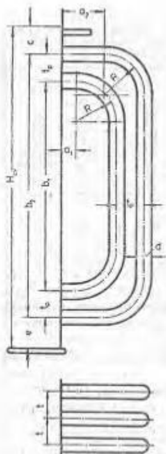


Figura 1.23. Poziționarea țevilor pe cuvă.

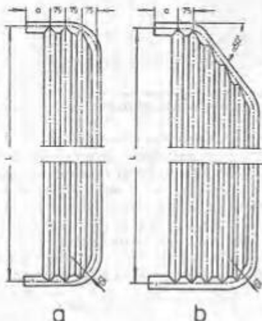


Figura 1.24. Lire din țevi: a — execuție normală; b — execuție adaptată la gabaritul de cale ferată.

Țevile utilizate au diametrele exterioare între 30 mm și 50 mm, cu grosimile pereților cuprinse între 1 mm și 1,5 mm. Țevile rotunde sînt, adesea, ovalizate, pentru reducerea cantității de ulei la aceeași suprafață de răcire. Astfel, țevile cu diametrul de 51 mm, după ovalizare, au dimensiunile de 72 × 20 mm.

Cuvele cu țevile prinse direct pe pereți se pot realiza pînă la maximum șase rînduri, modul de așezare a lor fiind reprezentat în figura 1.23, iar principalele date privind poziționarea lor pentru o răcire eficientă sînt date în tabelul 1.2 [2].

Realizarea cuvelor cu țevile prinse direct pe pereți necesită o manoperă destul de mare, fiecare țeavă fiind, separat, îndoită, montată și sudată pe peretele cuvei. De aceea, s-a trecut la cuvele cu lire din țevi (fig. 1.24), care necesită un număr redus de orificii în pereții cuvei, iar lirele pot fi realizate

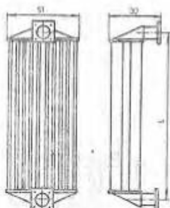


Figura 1.25. Radiatoare cu țevi drepte. Dimensiunile sînt în cm.

TABELUL 1.2

Date privind realizarea cuvelor cu țevi prinse direct pe pereți. Notațiile sînt cele din figura 1.23. Dimensiunile sînt în mm.

Dimensiuni țeavă (Ød)	ø 51	ø 30	ovală 72×20
R	150	150	128
t	70	50	50
t_p	75	55	100
a_1	50—80		60—100
c_{min}	60—120		70—130
e_{min}	70—130		80—140

Notă: $a_2 = a_1 + t_p$; $a_3 = a_1 + 2t_p$;
$a_n = a_1 + (n-1)t_p$;
$b_n = H_{cv} - c - e$; $b_{n-1} = b_n - 2t_p$;
$b_{n-2} = b_{n-1} - 2t_p$.

separat, ca subansambluri normalizate. Lirele pot avea două pînă la opt rînduri de țevi drepte, distanțele de montare pe cuvă fiind aceleași ca la țevi (tabelul 1.2). Cuvele cu radiatoare din țevi rotunde sau ovale, sub formă de baterii, au luat o mare răspîndire datorită avantajelor tehnologice de fabricație.

În figurile 1.25 și 1.26 sînt date două modele de radiatoare, iar în tabelel 1.3 și 1.4 sînt prezentate datele de bază ale acestor radiatoare. Radiatoarele cu țevi drepte (fig. 1.25) sînt formate din două rînduri de cîte 10 țevi (72 × 20 mm) și se folosesc la transformatoare cu puteri de la 100 la 6 300 kVA.

TABELUL 1.3

Datele de bază ale radiatoarelor cu țevi drepte, reprezentate în figura 1.25.

L [cm]	S_{cv} [m²]	G_{fer} [kg]	G_u [kg]
71	1,98	52,6	28,6
90	2,60	59,5	31,6
115	3,40	66,6	35,6
140	4,20	77,6	39,5
161,5	4,88	85,5	42,9
180	5,48	92,3	45,8
200	6,10	99,5	49,0
220	6,75	106,8	52,2
240	7,40	114	55,3

Notă: S_{cv} — aria de convecție a țevilor; G_{fer} — masa fierului radiatorului; G_u — masa uleiului din radiator. Aria de convecție a celor două colectoare de ulei se ia $S_{cc} \approx 0,4$ m².

TABELUL 1.4

Datele de bază ale radiatoarelor cu țevi îndoite, reprezentate în figura 1.26

L [cm]	Radiator simplu S_{CT} [m²]	Radiator simplu G_{FeR} [kg]	Radiator simplu G_u [kg]	Radiator dublu S_{CT} [m²]	Radiator dublu G_{FeR} [kg]	Radiator dublu G_u [kg]
188	11,45	205	161	22,9	380	276
200	12,1	215	169	24,15	401	291
228,5	13,55	236	184	27,05	442	321
248,5	14,55	249	194	29,1	468	341
268,5	15,6	264	201	31,15	499	362
300	17,2	285	219	34,35	540	393
325	18,45	302	232	36,9	575	418
375	21,0	337	258	42	644	469
400	22,3	352	269	44,6	675	492
425	24,6	373	284	47,2	716	521

Notă: S_{CT} — aria de convecție a țevilor; G_{FeR} — masa fierului radiatorului; G_u — masa uleiului din radiator. Aria de convecție a colectoarelor radiatorului simplu este $S_{cos} \approx 0,72$ m², iar a celui dublu $S_{cod} \approx 0,66$ m².

Radiatoarele cu țevi îndoite pot fi simple (fig. 1.26 a) și sînt formare din 1 × 16 = 32 de țevi (două rînduri a 16 țevi) sau duble (fig. 1.26 b), cînd au 2 × 2 × 16 = 64 țevi (patru rînduri a 16 țevi).

Radiatoarele cu țevi îndoite sînt utilizate la transformatoare mai mari, de la 2 500 kVA la 63 MVA.

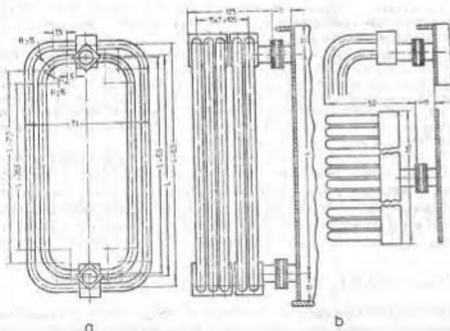


Figura 1.26. Radiatoare cu țevi îndoite. Dimensiunile sînt în cm.

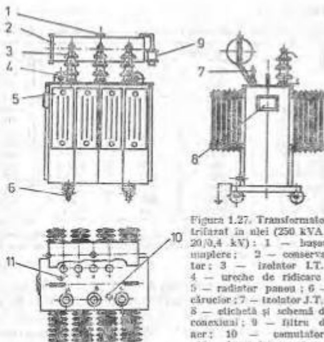


Figura 1.27. Transformator trifazat în ulei (250 kVA; 20/0,4 kV): 1 — buşon umplere; 2 — conservator; 3 — izolator I.T.; 4 — ureche de ridicare; 5 — radiator panou; 6 — cărucior; 7 — izolator J.T.; 8 — etichetă şi schemă de conexiuni; 9 — filtru de aer; 10 — comutator; 11 — locaş termometru.

Radiatoarele cu panouri se folosesc la transformatoarele cu puteri mici, de la 63 kVA la 1 600 kVA, putînd avea unul pînă la şapte elemente în paralel, cu lăţimi de 370 mm sau 520 mm (poz. 5 fig. 1.27).

Transformatoarele cu puteri peste 10 MVA au, în general, răcire artificială cu aer, constînd în amplasarea sub radiatoare a unor ventilatoare care asigură un debit mărit de aer cu sensul de jos în sus. La puteri mari se prevede execuţia transformatorului cu circulaţie forţată a uleiului şi cu răcire forţată cu aer (o baterie separată de radiatoare cu ventilatoare) sau cu apă (răcitor separat cu apă). Sub aspectul eficienţei răcirii, bateriile răcite cu apă sînt avantajoase, însă prezintă dificultăţi de etanşare.

În toate aceste cazuri, cuvele transformatoarelor sînt confecţionate din foi de tablă sudate, întărite prin nervuri. Marginea superioară a cuvei se termină, în general, cu o ramă de oţel cornier prevăzută cu găuri pentru şuruburi, prin intermediul cărora se face îmbinarea dintre capacul cuvei şi cuvă. Pe fundul cuvei (în exteriorul acesteia) se sudează, de obicei, cărucioare cu roţi pentru deplasarea transformatorului.

1.4.2. CAPACUL CUVEI

Se execută tot din tablă de oţel şi se prinde de rama cuvei cu ajutorul unor şuruburi. La transformatoarele de mică şi medie putere legătura dintre capac şi partea decuvabilă a transformatorului este de cele mai multe ori rigidă,

executată cu ajutorul a patru tiranţi de suspensie care leagă capacul de schelele jugului superior (fig. 1.21 şi fig. 3.51 — poz. 9).

La transformatoarele de greutate mică, pe capac se află urechile de ridicare a părţii decuvabile, iar la cele mai grele se practică guri de vizitare în capac, prin care se introduc cabluri de ridicare a părţii decuvabile, ce se prind de urechi special sudate pe schelă.

1.4.3. CONSERVATORUL

Conservatorul (poz. 2 fig. 1.27) are rolul de a asigura o suprafaţă de contact a uleiului cu aerul mai mică decît în cazul lipsei lui, micşorînd astfel posibilitatea de oxidare a uleiului. De asemenea, conservatorul asigură spaţiul necesar dilatărilor şi contractărilor uleiului în timpul încălzirii şi al răcirii transformatorului; în plus, uleiul în conservator nu este supus unor variaţii de temperatură aşa de mari ca în cuvă. Absorbţia de umiditate şi îmbătrînirea uleiului sînt, în acest caz, mult mai reduse. Conservatorul se utilizează la toate tipurile de transformatoare cu puteri mai mari de 75 kVA, avînd o singură cameră la transformatoarele cu reglaj în absenţa tensiunii şi două camere (cealaltă servind drept conservator al comutatorului de reglaj), la transformatoarele cu reglajul tensiunii sub sarcină.

Unii constructori de transformatoare îl consideră inutil, în locul conservatorului aplicîndu-se obişnuit etanşarea cuvei, variaţiile de volum ale uleiului egalizîndu-se printr-un spaţiu umplut cu azot sau aer.

La transformatoarele de putere mică şi medie conservatorul se aşază pe latura mai mică a capacului, în partea dreaptă cînd se priveşte din partea izolatoarelor de înaltă tensiune. Cînd se aşază în lungul transformatorului, atunci se aşază pe partea de joasă tensiune (fig. 1.27).

La puteri mari ale transformatoarelor, conservatorul este demontabil şi se poate aşeza separat de transformator. Capacitatea aproximativă a conservatorului este de 10% din volumul uleiului din transformator.

1.5. ACCESORIILE TRANSFORMATOARELOR [1, 2, 3]

Cele mai importante accesorii ale transformatoarelor sînt (v. fig. 1.27): *izolatoarele de trecere, releul de gaze, supapa de siguranţă, indicatoarele de temperatură, comutatorul de reglarea tensiunii şi filtrul de aer.*

1.5.1. IZOLATOARELE DE TRECERE

Izolatoarele transformatoarelor servesc la trecerea conductoarelor electrice prin capacul cuvei, permiţînd legarea intrărilor sau ieşirilor înfăşurărilor cu reţeaua electrică. Se compun dintr-o parte izolantă, de obicei din porţelan,

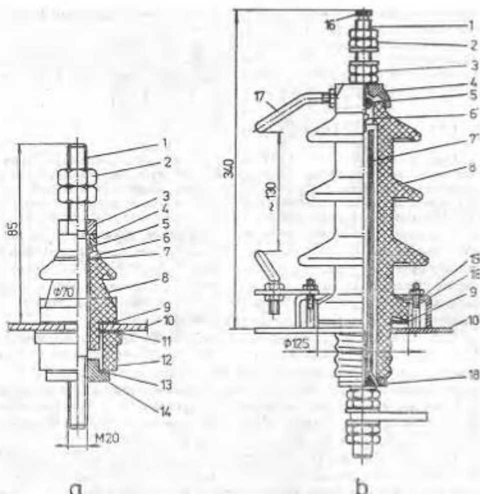


Figura 1.28. Izolatoare de trecere: a — de joasă tensiune ($U_n \leq 1$ kV); b — de înaltă tensiune: 1 — tije de trecere; 2 — piulițe de strîngere a conductoarelor; 3 — piulițe de strîngere a izolatorului; 4 — capac metalic; 5 — garnitură; 6 — șaibă de etanșare; 6' — bolț de siguranță; 7 — garnitură; 7' — tub izolant; 8 — corp izolator exterior; 9 — garnitură; 10 — capac cuvă; 11, 13 — garnituri de etanșare; 12 — corp izolator interior; 14 — guler de strîngere; 15 — bride de strîngere; 16 — prezon de strîngere; 17 — eclator; 18 — rondele de etanșare.

și d ntr-o parte conductoare de curent (fig. 1.28). Izolatoarele de trecere constituie ultimul element de protecție al rețelei și, în consecință, trebuie să limiteze, în anumite cazuri (de exemplu la căderea trăsnetului în imediata apropiere a transformatorului), amplitudinea undei se supratensiune.

Rolul limitator este asigurat de eclatoarele dispuse direct pe izolatori cu tensiuni peste 6 kV (fig. 1.28 b).

La valori ale curentului prin tija izolatorului mai mari de 600 A, pierderile în fierul capacului cuvei, provocate de fluxul magnetic creat în jurul

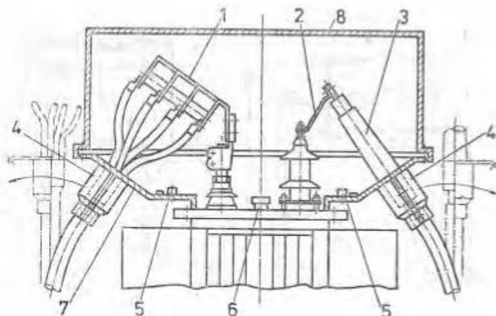


Figura 1.29. Cutie de cabluri, în aer: 1 — legătură cablu joasă tensiune (pentru patru fire în paralel); 2 — legături cablu înaltă tensiune; 3 — izolator aer-aer pentru cablu de înaltă tensiune; 4 — mufă fixare cablu; 5 — legare la pămînt; 6 — dispozitiv acționare comutator prize; 7 — partea inferioară a cutiei de cablu; 8 — partea superioară a cutiei de cablu.

zolatorului, devin mari, ducînd la o încălzire locală inadmisibilă a capacului; de aceea se impune utilizarea, în zona dintre izolatori, a unor fante care se umplu cu un material solid nemagnetic.

La curenți mari, dar și tensiuni ridicate, ansamblul de izolatoare de trecere se asamblează pe plăci din material nemagnetic (alamă, duraluminiu, pertinax) care se montează apoi pe capacul cuvei.

În practică, de regulă, deoarece calculul izolatoarelor de trecere este destul de dificil, tipurile de izolatoare utilizate în construcția transformatoarelor sînt normalizate sau standardizate.

În afara transformatoarelor cu ieșire prin izolatoare se construiesc și transformatoare cu ieșire prin cablu. În figura 1.29 este reprezentată o ieșire prin cabluri, în aer. Se observă că ieșirile din transformator se fac prin izolatoare de trecere obișnuite, iar racordarea rețelelor la transformator, atît pe partea de joasă tensiune cît și de înaltă tensiune, se face prin cabluri corespunzătoare.

În figura 1.30 sînt reprezentate două variante de ieșiri prin cabluri, în ulei. În prima variantă cablul de tensiune corespunzătoare se leagă direct la izolatorul de trecere, iar în cea de a doua variantă, pentru tensiuni mai mari, ieșirea cablului se face cu ajutorul unui izolator special; întregul ansamblu conexiuni este cufundat în ulei de transformator.

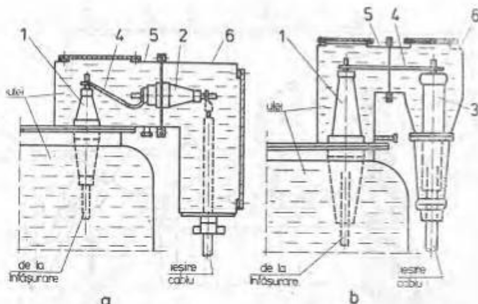


Figura 1.30. Cutie de cabluri, în ulei: a — pentru tensiuni pînă la 35 kV; b — pentru tensiuni mai mari de 35 kV; 1 — izolator ulei-ulei pentru ieşirea din transformator; 2 — izolator ulei-ulei intermediar (de trecere); 3 — izolator pentru cabluri de tensiuni înalte; 4 — legături; 5 — cutie de racordare; 6 — cutie cablu.

1.5.2. RELEUL DE GAZE

Releul de gaze este unul din aparatele cele mai răspîndite în practică pentru protecţia transformatoarelor, fiind cunoscut şi sub numele de releul Buchholz (v. fig. 6.2).

Orice neajunsuri în funcţionarea unui transformator (defectarea izolaţiei dintre spire, defectarea miezului etc.) dau naştere unor centre locale de temperatură ridicată, provocînd în locul respectiv descompunerea uleiului care este însoţită de eliminarea unor gaze ca produse ale descompunerii. Releul de gaze este montat pe conducta de legătură dintre capacul cuvei şi conservator, fiind prevăzut cu două plutitoare, cel superior (A în fig. 6.2) coborînd cînd se adună o anumită cantitate (mică) de gaze şi închizînd întreruptorul cu mercur al unei instalaţii de alarmă. În cazul defectelor importante cantitatea de gaze crescînd, în momentul evacuării lor către conservator sau cînd viteza de trecere a uleiului prin releu depăşeşte o anumită limită, releul comandă deconectarea transformatorului atît pe partea de joasă tensiune, cît şi pe cea de înaltă tensiune (B în fig. 6.2).

Releul mai poate comanda deconectarea transformatorului cînd nivelul uleiului din transformator a scăzut sub nivelul releului.

1.5.3. SUPAPA DE SIGURANȚĂ

Supapa de siguranță, care mai este denumită și *țeavă de evacuare*, asigură cuva transformatorului contra exploziilor (ca urmare a unei presiuni interioare excesive) și contra defectărilor ce produc o degajare bruscă și în cantitate mare de gaze.

În figura 1.31 se prezintă construcția unei supape de siguranță cu membrană din sticlă sau din pertinax și a unei supape cu piston. Grosimea acestei membrane se alege corespunzător cu presiunea pe care o poate suporta cuva.

Supapa de siguranță se prevede, în general, la transformatoarele cu puteri peste 1 000 kVA.

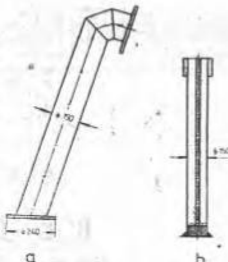


Figura 1.31. Supape de siguranță : a — cu membrană ; b — cu piston.

1.5.4. INDICATOARELE DE TEMPERATURĂ

Transformatoarele mici sînt înzestrate, pentru verificarea temperaturii uleiului în stratul superior, cu termometre simple, cu mercur. Orificiul în care se montează termometrul se prevede cu o teacă etanșă de protecție, care la montare se umple cu ulei.

Termometrele cu cadran sînt construite similar cu un manometru, acul indicator fiind legat la locul de măsurare printr-un tub capilar cu o lungime de cîțiva metri. Cadranul indicator se montează pe cuva transformatorului, fiind înzestrat frecvent și cu contacte pentru semnalizarea temperaturii maxime.

Transformatoarele cu o putere mai mare de 10 MVA se echipează cu termometre cu rezistență.

1.5.5. COMUTATORUL DE REGLARE A TENSIUNII

Cînd reglarea tensiunii se face în starea deconectată de la rețea a transformatorului, comutatorul are rolul de a modifica numărul de spire aflate în circuit, ceea ce implică modificarea tensiunii secundare.

Construcția acestuia depinde de valoarea tensiunii și a curentului nominal. Tipul de comutator liniar se folosește pentru un curent de regim de 60 A și pentru tensiuni pînă la 35 kV. Acest comutator este destinat transformatoarelor trifazate de putere pînă la cca. 1 600 kVA și poate ocupa trei poziții, corespunzătoare domeniului de reglaj de $\pm 5\%$.

În figura 1.32 se prezintă, detaliat, construcția unui comutator rotativ, folosit în prezent în diverse țări, pentru curenți de 100 A, cu cinci prize de reglaj ($\pm 2 \times 2,5\%$).

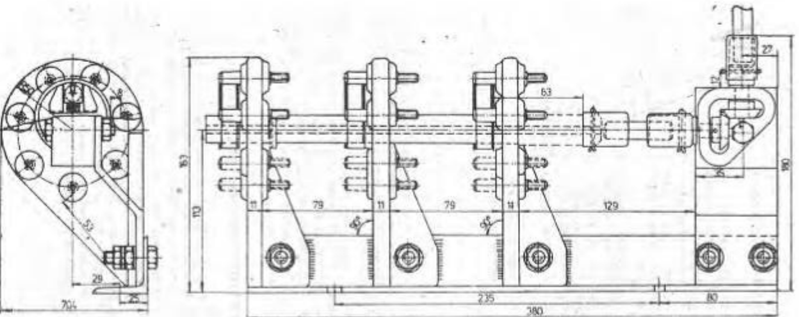


Figura 1.32. Comutator rotativ de 20 kV/100 A.

Acționarea din greșeală a comutatorului, cînd transformatorul este conectat la tensiunea de alimentare, provoacă formarea unui arc pe contacte, ducînd la distrugerea comutatorului. Din acest motiv transformatoarele se înzestrează adeseori cu dispozitive de blocare, care fac imposibilă acționarea comutatorului înaintea deschiderii întrerupătoarelor.

Comutatoarele pentru reglajul în sarcină al tensiunii transformatoarelor pot fi cu reactanță limitatoare și acționare lentă a contactelor ruptorului sau cu rezistențe de limitare și acționare rapidă a ruptorului (tip Jansen), iar manevrarea se face de pe cuvă, de la distanță (printr-un manipulator) sau automat, în funcție de căderea de tensiune din rețea.

Transformatoarele cu reglajul tensiunii în sarcină se prevăd cu mai multe prize. De exemplu, se prevăd cu 17 prize de reglaj ($\pm 8 \times 1{,}25\%$ din tensiunea nominală) pentru transformatoarele cu tensiunea înaltă de 66 kV sau cu 27 de prize de reglaj ($\pm 13 \times 1{,}25\%$ din tensiunea nominală) pentru transformatoarele de 220/110 kV.

1.5.6. FILTRUL DE AER

Filtrul de aer este montat pe conducta de legătură dintre conservator și mediul ambiant (poz. 9, fig. 1.27), izolînd uleiul de influența atmosferei (a umidității, a impurităților aerului). În etapa actuală, ca absorbant al umidității, se folosește silicagelul, care în stare uscată este *albastru*, iar sub influența umidității capătă culoarea *roșie*. Caracteristicile higroscopice ale silicagelului pot fi regenerate, încălzindu-l la o temperatură de 400—500°C.

Capitolul 2

TEORIA ŞI ÎNCERCĂRILE TRANSFORMATORULUI

2.1. PRINCIPIUL ŞI ECUAŢIILE DE FUNCŢIONARE [5, 8, 20]

Funcţionarea transformatorului are la bază legea inducţiei electromagnetice şi anume a inducţiei mutuale între două circuite imobile unul faţă de celălalt [8].

Fie miezul feromagnetic şi sistemul de înfăşurări ale unui transformator monofazat reprezentat schematic în figura 2.1. Mărimile aferente înfăşurării primare vor fi notate cu indice 1, iar cele aferente înfăşurării secundare cu indice 2, sensul de depănare (bobinare) al celor două înfăşurări fiind acelaşi. Dacă la bornele AX ale înfăşurării primare se aplică tensiunea u_1, a unei reţele electrice de curent alternativ, prin această înfăşurare se va stabili un curent electric i_1, tot alternativ. Acest curent străbate spirele înfăşurării primare şi produce o solenaţie w_1i_1. Solenaţia determină un cîmp magnetic variabil în timp. O parte a liniilor acestui cîmp magnetic se vor închide prin miezul magnetic al transformatorului şi vor înlănţui şi înfăşurarea secundară, producînd *fluxul magnetic util*, iar altă parte se vor închide prin aer în jurul înfăşurării primare producînd *fluxul magnetic de scăpări*, denumit şi *flux magnetic de dispersie* al primarului. Se numeşte *flux magnetic fascicular*, fluxul magnetic care înlănţuie o singură spiră a înfăşurării primare sau secundare.

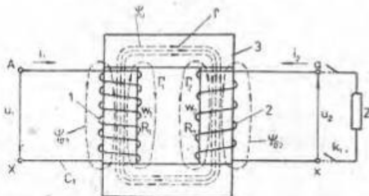


Figura 2.1. Schema transformatorului monofazat: 1 — înfăşurarea primară; 2 — înfăşurarea secundară; 3 — miez feromagnetic.

Fluxul magnetic fascicular ce străbate cele două înfăşurări este variabil în timp ca şi curentul i_1 care-l produce. Acest flux magnetic fascicular induce în spirele înfăşurării primare şi secundare tensiuni electromotoare. La bornele înfăşurării secundare ax, va apărea, deci, o tensiune proporţională cu numărul de spire al acesteia. Se va admite că fluxul magnetic fascicular are aceeaşi valoare pentru orice spiră a înfăşurărilor primară şi secundară.

Dacă fluxul magnetic fascicular creat de înfăşurarea primară este de forma

$$\varphi = \Phi_m \sin \omega t \text{ [Wb]} \tag{2.1}$$

unde :

$$\Phi_m = B_c S_c \text{ [Wb]},$$

reprezintă mărimea fluxului magnetic maxim printr-o spiră ;

B_c — inducţia magnetică maximă în miez, în T ;

S_c — aria secţiunii miezului, în m².

atunci, tensiunea electromotoare (t.e.m.) indusă în înfăşurarea secundară care are w_2 spire, pe baza legii inducţiei electromagnetice va fi :

$$e_2 = -w_2 \frac{d\varphi}{dt} = \omega w_2 \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = E_{2m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \text{ [V]}. \tag{2.2}$$

După cum se vede, valoarea maximă a acestei t.e.m. este

$$E_{2m} = \omega w_2 \Phi_m = 2\pi f w_2 \Phi_m, \tag{2.3}$$

iar valoarea eficace (denumită valoarea efectivă)

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 \Phi_m = 4{,}44 \, f w_2 \Phi_m \text{ [V]} \tag{2.4}$$

T.e.m. se notează uneori cu U_e, pentru a se distinge de intensitatea câmpului electric care se notează cu E. În această lucrare t.e.m. va fi notată, pentru simplificare, cu E, deoarece în cadrul lucrării nu intervine intensitatea câmpului electric.

Din relaţia (2.2) rezultă că t.e.m. indusă în înfăşurarea secundară este defazată în urma fluxului magnetice care o produce cu $\frac{\pi}{2}$ radiani.

Dacă la bornele înfăşurării secundare se conectează un receptor, atunci circuitul se închide şi sub acţiunea t.e.m. e_2, se va stabili în circuit un curent i_2, iar la bornele înfăşurării secundare va apărea în acest caz tensiunea u_2.

Transformatorul absoarbe deci din reţea puterea instantanee $u_1 i_1$, prin înfăşurarea primară şi debitează receptorului puterea instantanee $u_2 i_2$, prin înfăşurarea secundară.

Neglijînd pierderile din transformator, procesul de transformare va fi caracterizat prin relaţia de conservare a puterilor

$$u_1 i_1 \approx u_2 i_2.$$

Prin urmare, transformatorul este o mașină electrică care nu are elemente în mișcare și transformă valorile mărimilor energiei electrice de intrare u_1, i_1 în alte valori ale celor de ieșire u_2, i_2 necesare la consumator.

La funcționarea în sarcină înfășurarea primară produce o solenație, de valoare instantanee $w_1 i_1$ numită *solenație de excitație*, iar înfășurarea secundară produce o solenație de valoare instantanee $w_2 i_2$ numită *solenație de reacție*.

Cele două solenații se compun obținîndu-se *solenația rezultantă* în valoare instantanee f_u, care determină un cîmp magnetic rezultant a cărui valoare se poate afla prin aplicarea legii circuitului magnetic pe conturul Γ din figura 2.1

$$f_u = w_1 i_1 + w_2 i_2 \text{ [A]}. \tag{2.5}$$

În cazul cînd amplitudinile tensiunilor u_1 și u_2 sînt constante, din relația (2.4) rezultă că și amplitudinea fluxului magnetic rezultant în miez este constantă.

Urmează, deci, că amplitudinea solenației rezultante este de asemenea constantă. În legătură cu semnificația fizică a solenației rezultante (sau de magnetizare) a se vedea și relația (2.18) cu referire la I_{10}.

Studiul transformatorului poate fi făcut în două moduri, de fapt asemănătoare. În primul mod, se pleacă de la ecuațiile tensiunilor pentru circuitele electrice, iar în cel de al doilea mod, se stabilesc ecuațiile tensiunilor utilizînd o împărțire a fluxurilor magnetice în fluxuri utile și de scăpări (unele lucrări denumesc cele două moduri de studiu *teoria fizică*, respectiv *teoria tehnică* a transformatorului).

În cadrul primului mod de studiu, pentru regimurile permanente de lucru, se fac, de obicei, următoarele ipoteze simplificatoare:

a) se neglijează saturația miezului feromagnetic, adică se consideră caracteristica de magnetizare liniară, putînd aplica deci, principiul suprapunerii efectelor;

b) se neglijează pierderile în miezul feromagnetic, deci, curenții turbionari și fenomenul de histerezis;

c) se consideră regimul cvasistaționar, ceea ce înseamnă că se neglijează curenții de deplasare dintre spire, dintre înfășurări și dintre înfășurări și miezul feromagnetic;

d) înfășurările se consideră cu parametri concentrați.

Acest mod de studiu, cu ipotezele menționate, nu permite reliefarea mai departe a fenomenului de saturație magnetică și a pierderilor din miezul feromagnetic, care nu pot fi trecute cu vederea la transformatoarele de putere.

De aceea, în cele ce urmează, se va dezvolta cel de al doilea mod de studiu al transformatorului, în cadrul căruia se va considera fenomenul de saturație a circuitului magnetic și se vor neglija, în prima etapă, pierderile în miezul feromagnetic denumite în mod simplificat pierderi în oțel sau pierderi în fier, apoi, în a doua etapă, se vor lua în considerație și aceste pierderi în miezul feromagnetic.

2.1.1. ECUAȚIILE TENSIUNILOR TRANSFORMATORULUI CÎND SE CONSIDERĂ SATURAȚIA CIRCUITULUI MAGNETIC

Saturația circuitului magnetic se caracterizează prin dependența neliniară între fluxul magnetic și solenație, neputîndu-se aplica metoda suprapunerii efectelor. Solenația rezultantă f_μ, determină fluxul magnetic fascicular util φ, care străbate atît spirele înfășurării primare care are w_1 spire, cît și spirele înfășurării secundare care are w_2 spire, obținîndu-se fluxurile magnetice utile ψ_{u1} și ψ_{u2} ale celor două înfășurări.

Datorită saturației miezului feromagnetic, fluxurile magnetice utile nu sînt funcții liniare, în raport cu solenația rezultantă f_μ care le creează, dependența dintre ele putîndu-se considera ca în figura 2.2.

În figura 2.1 sînt reprezentate și liniile cîmpurilor magnetice de scăpări ale celor două înfășurări. Liniile cîmpului magnetic de scăpări al înfășurării primare în raport cu înfășurarea secundară determină fluxul magnetic total de scăpări $\psi_{\sigma1}$.

Fluxul magnetic $\psi_{\sigma1}$, este determinat de solenația primară și este deci proporțional cu aceasta. Acest lucru permite definirea unei inductanțe de scăpări $L_{\sigma1}$ a înfășurării primare care rezultă din relația

$$\psi_{\sigma1} = w_1 \varphi_{\sigma1} = L_{\sigma1} i_1 \qquad (2.6)$$

unde, $\varphi_{\sigma1}$ este fluxul magnetic fascicular de scăpări al înfășurării primare.

În cazul transformatoarelor cu miez feromagnetic se poate admite ca o bună aproximație, deoarece permeabilitatea magnetică a miezului este mult mai mare decît aceea a aerului, că toate liniile de cîmp magnetic care înlănțuie ambele înfășurări se închid prin miezul feromagnetic. În acest caz, se poate admite că fluxul magnetic util este produs de liniile de cîmp magnetic

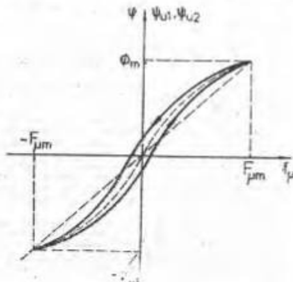


Figura 2.2. Variația fluxurilor utile în funcție de solenația rezultantă (caracteristica de magnetizare) a unui circuit magnetic format din tole de oțel.

care se închid prin miezul feromagnetic, iar fluxul magnetic de scăpări este produs de liniile de cîmp magnetic care se închid prin aer.

Fluxul magnetic $\psi_{\sigma 1}$ ale cărui linii de cîmp se închid deci prin aer (vezi fig. 2.1) este mic în raport cu fluxul magnetic util ale cărui linii se închid prin miez, deoarece, cum s-a menționat, permeabilitatea magnetică a miezului feromagnetic este mult mai mare decît cea a aerului și ca atare, miezul concentrează marea majoritate a liniilor de cîmp magnetic.

În mod analog, se poate defini fluxul magnetic de scăpări și inductanța $L_{\sigma 2}$ la înfășurarea secundară în raport cu înfășurarea primară

$$\psi_{\sigma 2} = w_2 \varphi_{\sigma 2} = L_{\sigma 2} i_2 \tag{2.7}$$

unde, $\varphi_{\sigma 2}$ este fluxul magnetic fascicular de scăpări al înfășurării secundare.

Fluxurile magnetice totale, ψ_1 pentru înfășurarea primară și ψ_2 pentru înfășurarea secundară vor fi deci:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \psi_{u1} + \psi_{\sigma 1} = w_1 \varphi + L_{\sigma 1} i_1; \\ \psi_2 &= \psi_{u2} + \psi_{\sigma 2} = w_2 \varphi + L_{\sigma 2} i_2. \end{aligned} \tag{2.8}$$

Avînd expresiile acestor fluxuri magnetice și aplicînd legea inducției electromagnetice circuitelor primare și secundare din figura 2.1, cu respectarea regulilor de asociere a sensurilor pentru curenți și tensiuni corespunzătoare unui receptor (înfășurarea primară) și unui generator (înfășurarea secundară) se poate scrie:

$$\begin{aligned} R_1 i_1 - u_1 &= -w_1 \frac{d\varphi}{dt} - L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}; \\ R_2 i_2 + u_2 &= -w_2 \frac{d\varphi}{dt} - L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} \end{aligned} \tag{2.9}$$

unde:

R_1 — rezistența pe fază a înfășurării primare;
R_2 — rezistența pe fază a înfășurării secundare.

Observație. Se reamintește că regulile de asociere a sensurilor pozitive privind mărimile electrice, adaptate la scrierea ecuațiilor transformatorului au la bază următoarele convenții [20]:

— pentru înfășurarea primară considerată ca receptor se adoptă convenția de la receptoare, adică în circuitul primar, sensul pozitiv al curentului i_1 este opus în raport cu sensul pozitiv al tensiunii la borne u_1, ales arbitrar (dacă se parcurge circuitul primar în sensul curentului i_1, atunci tensiunea u_1 se întîlnește în sens invers, sau altfel spus, atît i_1 cît și u_1, pleacă din același punct A — figura 2.1);

— sensul pozitiv al curentului secundar i_2 se alege astfel, încît solenațiile primară și secundară să magnetizeze miezul feromagnetic în același sens; adică fluxurile magnetice produse de cele două înfășurări prin miez (determinate cu regula tirbușonului) să aibă același sens în miez;

— pentru înfășurarea secundară considerată generator se adoptă convenția de la generatoare, adică în circuitul secundar sensul pozitiv al tensiunii la borne u_2, este același cu sensul pozitiv al curentului i_2, stabilit la punctul anterior (dacă se parcurge circuitul secundar în sensul curentului i_2, atunci tensiunea u_2, se întîlnește în același sens, sau altfel spus — vezi figura 2.1 — din punctul a, care constituie începutul înfășurării secundare, i_2 iese, iar u_2 intră).

Aplicînd legea lui Ohm pe circuitul de sarcină din secundarul transformatorului, cu impedanţa Z pe fază (cînd k_1 este închis) se obţine

$$u_2 = Ri_2 + L\frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C}\int i_2 dt, \tag{2.10}$$

unde:
R — rezistenţa pe fază a consumatorului;
L — inductanţa pe fază a consumatorului;
C — capacitatea pe fază a consumatorului.

Dependenţa neliniară dintre fluxul magnetic util φ şi solenaţia totală care il produce este dată de relaţia

$$\varphi = \frac{L_u}{w_1 w_2} f_u, \tag{2.11}$$

unde:
L_u — inductanţa corespunzătoare fluxului magnetic util;
f_u — solenaţia rezultantă de magnetizare (valoare instantanee).

Sistemul de ecuaţii diferenţiale care rezultă din relaţiile (2.9), (2.10), (2.11) şi (2.5) defineşte complet comportarea transformatorului în sarcină cu considerarea saturaţiei miezului magnetic şi anume:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 i_1 + L_{\sigma 1}\frac{di_1}{dt} + w_1\frac{d\varphi}{dt}; \\ -u_2 &= R_2 i_2 + L_{\sigma 2}\frac{di_2}{dt} + w_2\frac{d\varphi}{dt}; \\ u_2 &= Ri_2 + L\frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C}\int i_2 dt; \\ \varphi &= \frac{L_u}{w_1 w_2} f_u; \\ f_u &= w_1 i_1 + w_2 i_2. \end{aligned} \tag{2.12}$$

Acest sistem are coeficienţii R_1, R_2, $L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$, R, L, C constanţi, deci independenţi de curenţii i_1, i_2 sau de tensiunile u_1, u_2 şi un coeficient variabi L_u care depinde de gradul de saturaţie al circuitului magnetic, deci, de curenţi i_1 şi i_2.

Prin urmare, dacă tensiunea aplicată înfăşurării primare este o mărime sinusoidală de forma

$$u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin \omega t,$$

atunci, curenţii, fluxurile magnetice şi tensiunea u_2 nu vor mai fi sinusoidali.

Analizînd prima ecuaţie a sistemului (2.12) se observă că valoarea lui R_1 este relativ mică în vederea obţinerii unui randament ridicat şi a unei căderi mici de tensiune, încît chiar la regimul nominal de sarcină, de regulă $R_1 i_1 < < 0{,}01 u_1$. Deoarece, în mod normal, miezul feromagnetic nu este prea saturat în nici un regim normal de funcţionare a transformatorului, atunci, fluxul magnetic de scăpări $\varphi_{\sigma 1} < (0{,}03—0{,}10) w_1\varphi$ ($w_1\varphi$, fiind fluxul magnetic

util), întrucît permeabilitatea magnetică a miezului feromagnetic este mult mai mare decît permeabilitatea magnetică a aerului. Prin urmare se pot neglija, într-o primă aproximaţie, în funcţionarea transformatorului atît termenul R_1i_1 în raport cu u_1 cît şi termenul $L_{\sigma 1}\frac{di_1}{dt}$ în raport cu $w_1\frac{d\varphi}{dt}$. În acest caz prima ecuaţie a sistemului (2.12) devine

$$u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin \omega t \approx w_1 \frac{d\varphi}{dt}. \qquad (2.13)$$

Relaţia (2.13) ne arată că în funcţionarea transformatorului, fluxul magnetic fascicular este determinat ca valoare instantanee (în funcţie de timp), de tensiunea u_1 aplicată la bornele înfăşurării primare (se face abstracţie de regimurile tranzitorii).

Tensiunea u_1 fiind sinusoidală, atunci din relaţia (2.13) rezultă

$$\varphi = \int d\varphi \approx \int \frac{\sqrt{2}U_1}{w_1} \sin \omega t dt = \frac{\sqrt{2}U_1}{w_1\omega} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \qquad (2.14)$$

Aceasta înseamnă că fluxul magnetic fascicular variază sinusoidal în timp şi este defazat cu $\pi/2$ în urma tensiunii aplicate. Amplitudinea fluxului magnetic fascicular util are expresia

$$\Phi_m \approx \frac{\sqrt{2}U_1}{w_1\omega} \qquad (2.15)$$

şi, în mod practic, nu este influenţat de gradul de încărcare al transformatorului. Dacă valoarea eficace a tensiunii de alimentare U_1 este constantă, atunci valoarea maximă a fluxului magnetic Φ_m este constantă, indiferent dacă $i_2 = 0$ (cînd transformatorul funcţionează în gol) sau i_2 are o valoare cuprinsă în intervalul sarcinii admisibile. În acest caz, inductanţa L_u, corespunzătoare fluxului magnetic util, s-ar putea defini ca o mărime constantă şi sistemul (2.12) ar avea toţi coeficienţii constanţi.

Deoarece însă dependenţa $\varphi = f(f_\mu)$ este neliniară, între limitele $\pm\Phi_m$ (v. fig. 2.2) rezultă că şi inductanţa utilă L_u este o mărime variabilă, depinzînd de gradul de saturaţie al transformatorului, valoarea ei rezultînd din ecuaţia a patra a relaţiilor (2.12), pentru fiecare valoare a fluxului magnetic φ.

În cele ce urmează, se va considera doar fundamentala undei solenaţiei $F_{\mu m}$, căreia îi corespunde din figura 2.2, fluxul magnetic Φ_m; pentru aceste valori se va determina inductanţa utilă cu relaţia (v. ecuaţia a patra a rel. (2.12))

$$L_u = \frac{w_1 w_2 \Phi_m}{F_{\mu m}}. \qquad (2.16)$$

Valoarea eficace a tensiunii de alimentare U_1, fiind constantă în timpul funcţionării transformatorului urmează, cu o bună aproximaţie determinată de simplificările admise referitor la relaţia (2.13), că pe baza relaţiei (2.16) şi inductanţa L_u reprezintă o mărime constantă pentru un transformator dat.

În acest caz, sistemul (2.12) se transformă într-un sistem cu coeficienţi constanţi, putînd aplica metoda reprezentării în complex simplificat, cunoscută în electrotehnică pentru calculul circuitelor în curent alternativ sinusoidal.

Această metodă de simplificare în complex asociază unei mărimi variabile sinusoidal în timp, un fazor reprezentat în planul complex, înlocuind operația de derivare din calculul cu mărimi în valori instantanee, cu operația de înmulțire a fazorului mărimii respective cu mărimea $j\omega$ și de asemenea înlocuiește operația de integrare a mărimilor în valori instantanee, cu operația de împărțire a fazorului din planul complex prin mărimea $j\omega$. De exemplu:

$u = \sqrt{2}U \sin \omega t$, se reprezintă în complex simplificat prin $\underline{U}$ (mărimea fazorială se subliniază jos);

$\frac{du}{dt}$ — este reprezentat prin $j\omega\underline{U}$;

$\int u dt$ — este reprezentat prin $\frac{1}{j\omega}\underline{U}$.

La reprezentarea în complex simplificat pentru mărimile electrice se folosesc valorile eficace, iar pentru mărimile magnetice se folosesc valorile maxime (valorile eficace pentru mărimile magnetice nu au o semnificație fizică simplă).

Ca urmare, la reprezentarea în complex simplificat, valoarea instantanee a fluxului φ se înlocuiește, cu $\frac{1}{\sqrt{2}}\Phi_m$. Sistemul (2.12) în reprezentarea complexă va fi:

$$\underline{U}_1 = R_1\underline{I}_1 + j\omega L_{\sigma 1}\underline{I}_1 + \frac{1}{\sqrt{2}}j\omega w_1\underline{\Phi}_m;$$

$$-\underline{U}_2 = R_2\underline{I}_2 + j\omega L_{\sigma 2}\underline{I}_2 + \frac{1}{\sqrt{2}}j\omega w_2\underline{\Phi}_m;$$

$$\underline{U}_2 = R\underline{I}_2 + j\omega L\underline{I}_2 + \frac{1}{j\omega C}\underline{I}_2; \tag{2.17}$$

$$\underline{\Phi}_m = \frac{L_\mu\sqrt{2}}{w_1 w_2}\underline{F}_\mu;$$

$$\underline{F}_\mu = w_1\underline{I}_1 + w_2\underline{I}_2,$$

unde prin F_μ se înțelege valoarea eficace a solenației de magnetizare.

Din concluzia anterioară referitoare la relația aproximativă (2.15), că fluxul Φ_m este constant, reiese că și solenația rezultantă F_μ trebuie să fie într-o primă aproximație tot constantă, deci, să nu depindă de gradul de încărcare al transformatorului. Deoarece solenația rezultantă eficace, la tensiunea U_1 constantă, este practic constantă, independentă de curenții I_1 și I_2 rezultă că pentru regimul de funcționare în gol, cînd $I_2 = 0$ și $I_1 = I_{10}$ se poate scrie

$$\underline{F}_\mu = w_1\underline{I}_{1\mu} \approx w_1 I_{10}, \tag{2.18}$$

unde:

$I_{1\mu}$, este curentul de magnetizare (valoare eficace).

Semnificaia fizică a curentului $I_{1\mu}$ rezultă din aceeași relație; adică $I_{1\mu}$ reprezintă intensitatea curentului care, parcurgînd înfășurarea primară cînd înfășurarea secundară ar fi deschisă, ar produce o solenație egală cu solenația rezultantă. Curentul $I_{1\mu}$ se numește deci, *curent de magnetizare*, deoarece asigură magnetizarea circuitului magnetic al transformatorului.

Înlocuind în complex simplificat t.e.m. utile primare și secundare date de relațiile:

$$\underline{E}_1 = -\frac{1}{\sqrt{2}} j\omega w_1 \underline{\Phi}_m = -j\omega w_1 \frac{L_u}{w_1 w_2} \underline{F}_\mu = -j\omega L_u \frac{w_1}{w_2} \underline{I}_{1\mu};$$

$$\underline{E}_2 = -\frac{1}{\sqrt{2}} j\omega w_2 \underline{\Phi}_m = -j\omega w_2 \frac{L_\mu}{w_1 w_2} \underline{F}_\mu = -j\omega L_\mu \underline{I}_\mu \tag{2.19}$$

în sistemul de ecuații (2.17), se obține

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \underline{I}_1 - \underline{E}_1;$$
$$-\underline{U}_2 = R_2 \underline{I}_2 + jX_{\sigma 2} \underline{I}_2 - \underline{E}_2;$$
$$\underline{U}_2 = R\underline{I}_2 + jX\underline{I}_2 = \underline{Z}\underline{I}_2;$$
$$\underline{\Phi}_m = \sqrt{2}\frac{1}{w_1^2}\frac{X_{1\mu}}{\omega}\underline{F}_\mu = \sqrt{2}\frac{X_{1\mu}}{w_1}\underline{I}_{1\mu}; \tag{2.20}$$
$$\underline{F}_\mu = w_1 \underline{I}_{1\mu} \approx w_1 \underline{I}_1 + w_2 \underline{I}_2,$$

unde s-au folosit notațiile:

$X_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1}$ — reactanța de scăpări pe fază a circuitului primar;

$X_{\sigma 2} = \omega L_{\sigma 2}$ — reactanța de scăpări pe fază a circuitului secundar;

$X_{1\mu} = \omega \frac{w_1}{w_2} L_\mu$ — reactanța pe fază a fluxului magnetic util;

$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ — reacție echivalentă pe fază a sarcinii;

$Z = R + jX$ — impedanța pe fază a sarcinii (consumatorului).

Pe baza acestor ecuații date de relațiile (2.19) și (2.20) se poate face o schemă echivalentă cu parametrii concentrați pentru regimul permanent de sarcină al transformatorului, reprezentată în figura 2.3 și diagrama de fazori corespunzătoare, reprezentată în figura 2.4.

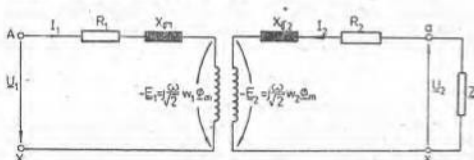


Figura 2.3. Schema echivalentă a transformatoarelor cu circuitele primar și secundar separate, corespunzătoare sistemului de ecuații reprezentat de relațiile (2.19) și (2.20).

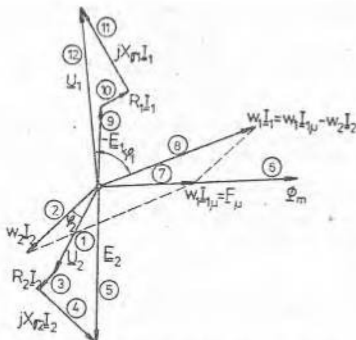


Figura 2.4. Diagrama de fazori a transformatorului, corespunzătoare sistemului de ecuații reprezentat de relațiile (2.20).

Diagrama de fazori se realizează considerînd pe $\underline{I}_2$ ca mărime dată și pe $\underline{U}_2$, de asemenea cunoscut. Ordinea de construire a diagramei este indicată prin numere pe figură (încercuite) și are la bază relațiile (2.20).

2.1.2. ECUAȚIILE, SCHEMA ECHIVALENTĂ ȘI DIAGRAMA DE FAZORI CÎND CIRCUITUL SECUNDAR ESTE RAPORTAT LA PRIMAR

Parametrii celor două circuite ale transformatorului sînt dependenți de numărul de spire corespunzătoare înfășurărilor. De aceea, pentru a ușura compararea parametrilor celor două înfășurări, se apelează la *raportarea unui circuit la celălalt*. De obicei, se face raportarea înfășurării secundare a transformatorului la cea primară, adică primarul se menține neschimbat, iar secundarul real se înlocuiește cu unul echivalent, care are același număr de spire ca primarul și păstrează neschimbat regimul de funcționare al transformatorului. Mărimile raportate se vor nota cu semnul prim ('). Pentru ca secundarul real să fie echivalent cu secundarul raportat trebuie respectate următoarele condiții :

a) puterea aparentă a circuitului real să fie egală cu puterea aparentă a circuitului raportat

$$U_2I_2 = U_2'I_2' ; \qquad (2.21)$$

b) pierderile de putere activă în cele două circuite trebuie să fie egale

$$R_2 I_2^2 = R_2' I_2'^2; \tag{2.22}$$

c) pierderile de putere reactivă în cele două circuite trebuie să fie egale

$$X_2 I_2^2 = X_2' I_2'^2; \tag{2.23}$$

d) solenațiile celor două înfășurări (reală și raportată) trebuie să fie egale.

Odată cu raportarea înfășurării secundare la primar se va menține neschimbată valoarea solenației secundare, astfel că egalitatea solenațiilor se va scrie

$$w_2 \underline{I}_2 = w_1 \underline{I}_2' \tag{2.24}$$

de unde, rezultă curentul din înfășurarea raportată $\underline{I}_2'$, în funcție de curentul $\underline{I}_2$ din înfășurarea secundară

$$\underline{I}_2' = \frac{w_2}{w_1} \underline{I}_2. \tag{2.25}$$

Tensiunea secundară raportată, va fi dată de expresia

$$\underline{U}_2' = \frac{w_1}{w_2} \underline{U}_2. \tag{2.26}$$

Rezistența și reactanța înfășurării secundare raportate, se pot deduce din relațiile (2.22) și (2.23) pe baza relației (2.25):

$$\begin{aligned} R_2' &= \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 R_2; \\ X_{\sigma 2}' &= \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 X_{\sigma 2}. \end{aligned} \tag{2.27}$$

Scrierea ecuațiilor din sistemul (2.20), care conțin mărimi secundare sub noua formă raportată, se va face avînd în vedere modul de raportare al mărimilor secundare la primar. Astfel, înmulțind ecuațiile tensiunilor secundare (ecuațiile a 2-a și a 3-a) din sistemul (2.20) cu $\left(\frac{w_1}{w_2}\right)$ și grupînd corespunzător termenii, se obțin ecuațiile:

$$\begin{aligned} -\underline{U}_2\left(\frac{w_1}{w_2}\right) &= R_2\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2\left(\underline{I}_2\frac{w_2}{w_1}\right) + jX_{\sigma 2}\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2\left(\underline{I}_2\frac{w_2}{w_1}\right) - \underline{E}_2\left(\frac{w_1}{w_2}\right) \\ \underline{U}_2\left(\frac{w_1}{w_2}\right) &= R\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2\left(\underline{I}_2\frac{w_2}{w_1}\right) + jX\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2\left(\underline{I}_2\frac{w_2}{w_1}\right). \end{aligned} \tag{2.28}$$

care, pe baza relaţiilor (2.25), (2.26) şi (2.27) devin:

$$-\underline{U}_2' = R_2'\underline{I}_2' + jX_{\sigma2}'\underline{I}_2' - \underline{E}_1;$$

$$\underline{U}_2' = R'\underline{I}_2' + jX'\underline{I}_2' = \underline{Z}'\underline{I}_2' \qquad (2.28\ a)$$

deoarece

$$\underline{E}_2\frac{w_1}{w_2} = -\frac{1}{\sqrt{2}}j\omega w_2\underline{\Phi}_m\frac{w_1}{w_2} = -\frac{1}{\sqrt{2}}j\omega w_1\underline{\Phi}_m = \underline{E}_1.$$

Ecuaţiile de funcţionare ale transformatorului cu secundarul raportat la primar, pe baza relaţiilor (2.20) şi (2.28 a), vor fi deci:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= R_1\underline{I}_1 + jX_{\sigma1}\underline{I}_1 - \underline{E}_1; \\ -\underline{U}_2' &= R_2'\underline{I}_2' + jX_{\sigma2}'\underline{I}_2' - \underline{E}_1; \\ \underline{U}_2' &= R'\underline{I}_2' + jX'\underline{I}_2' = \underline{Z}'\underline{I}_2'; \\ \underline{I}_{1\mu} &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2'; \\ \underline{\Phi}_m &= \sqrt{2}\,\frac{X_{1\mu}}{w_1}\,\underline{I}_{1\mu}. \end{aligned} \qquad (2.29)$$

Primele două ecuaţii ale sistemului (2.29) au aceeaşi t.e.m. E_1, deci, cele două circuite se pot cupla galvanic. Schema echivalentă pentru transformatorul cu înfăşurarea secundară raportată la cea primară, este reprezentată în figura 2.5, iar în figura 2.6 este reprezentată diagrama de fazori corespunzătoare care se construieşte pornind de la ecuaţia a treia a sistemului. Ordinea

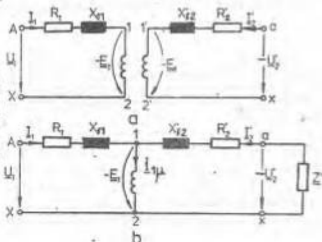


Figura 2.5. Schemele echivalente ale transformatorului cu mărimile secundare raportate la primar şi cu neglijarea pierderilor în fier: a — schema cu circuitele primar şi secundar separate; b — schema cu cuplaj galvanic între cele două circuite.

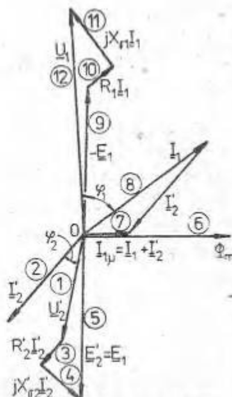


Figura 2.6. Diagrama de fazori a transformatorului monofazat cu mărimile secundare raportate la primar și neglijarea pierderilor în fier.

de construire a diagramei este indicată în figură prin numere încercuite puse lîngă fazori.

În diagrama de fazori din figura 2.6, cu mărimile corespunzătoare secundare raportate la primar, este creată posibilitatea de comparare a mărimilor, avînd ca mărime comună pe E_1, față de diagrama din figura 2.4, unde nu se poate face o comparare directă a mărimilor între ele.

Observație. Există diferite moduri posibile de asociere a sensurilor pentru tensiuni și curenți la borne, atît pentru mărimile neraportate cît și pentru cele raportate la una din înfășurări.

O analiză a avantajelor pe care le reprezintă fiecare dintre acestea a fost efectuată în literatură [17], [18]. Oricare dintre aceste moduri de asociere însă, duce la rezultate corecte. În cazul de față s-a adoptat una dintre posibilități mult folosită în literatură și care nu necesită modificări de semn la efectuarea raportării.

De asemenea, se poate menționa că uneori este necesară raportarea înfășurării primare la cea secundară, care se face în mod analog.

2.1.3. TEORIA TRANSFORMATORULUI CÎND SE CONSIDERĂ ȘI PIERDERILE ÎN FIER

Teoria transformatorului dezvoltată pînă aici s-a făcut în cazul luării în considerare a fenomenului de saturație magnetică și neglijarea pierderilor în fier. În continuare, se vor lua în considerare și pierderile în fier într-o formă globală, fără a analiza separat pierderile prin histerezis și pierderile prin curenți turbionari.

La magnetizarea ciclică (alternativă) a miezului transformatorului, amplitudinea cîmpului magnetic din miez variază în timp, însă, direcția cîmpului rămîne constantă. Ca urmare, în miezul feromagnetic al transformatorului se produc pierderi prin histerezis și prin curenți turbionari, pierderi care depind de pierderile specifice (pe unitatea de masă a miezului feromagnetic), de masa miezului, de frecvența de magnetizare și de valoarea inducției magnetice în miez.

Pierderile principale specifice (pe unitatea de masă) în miezul feromagnetic pentru o inducţie magnetică B şi o frecvenţă de variaţie f, sînt date de relaţia (v. şi cap. 3, rel. (3.44))

$$p_{Fe} = p_H + p_F = \sigma_H f B^2 + \sigma_F f^2 B^2 \ [\mathrm{W/kg}] \qquad (2.30)$$

unde:

p_H — pierderile specifice prin histerezis;

p_F — pierderile specifice prin curenţi Foucault (turbionari).

La transformatoare circuitul feromagnetic se confecţionează din tablă silicioasă de oţel laminată la rece cu cristale orientate, avînd grosimea maximă de 0,35 mm şi un conţinut de 2,5—3,5% siliciu, astfel încît la o inducţie magnetică $B = 1\mathrm{T}$ şi o frecvenţă $f = 50$ Hz pierderile specifice sînt:

$$p_{10/50} = (0{,}4—0{,}9)\ \mathrm{W/kg}.$$

Din relaţia (2.30) se observă că pierderile în miezul feromagnetic al transformatorului depind de frecvenţă şi, prin inducţia magnetică, de fluxul magnetic util; deci, la frecvenţă constantă, pierderile în miez depind de pătratul fluxului magnetic. La rîndul lui, fluxul magnetic util, induce t.e.m. $\underline{E}_1$, a cărei mărime, practic, se poate considera că nu depinde de sarcină ci numai de tensiunea de alimentare.

Pentru a arăta acest lucru se consideră ecuaţia de funcţionare a circuitului primar al transformatorului

$$\underline{U}_1 = R_1\underline{I}_1 + jX_{\sigma1}\underline{I}_1 - \underline{E}_1. \qquad (2.31)$$

Deoarece căderea de tensiune pe impedanţa înfăşurării primare (rezistenţă + reactanţa de scăpări) este mică (vezi relaţia (2.13) şi ipotezele pe baza cărora s-a dedus aceasta), adică:

$$(R_1 + jX_{\sigma1})\underline{I}_1 \approx (1 - 2)\%\,\underline{U}_{1N}$$

acest termen se poate neglija şi ecuaţia circuitului primar de mai sus devine

$$\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} j\omega w_1 \underline{\Phi}_m. \qquad (2.31\ a)$$

Deci, se poate admite cu o aproximaţie satisfăcătoare (prin neglijarea lui R_1 şi $X_{\sigma1}$), că pierderile în miezul feromagnetic al transformatorului la frecvenţă dată, depind, prin $\underline{\Phi}_m$, de pătratul tensiunii de alimentare şi nu depind de gradul de încărcare al transformatorului. Aceasta înseamnă că schema electrică se poate completa cu o rezistenţă R_{m1}, pusă în paralel cu reactanţa utilă $X_{1\mu}$, amîndouă fiind alimentate la aceeaşi tensiune $\underline{E}_1$, ca în figura 2.7.

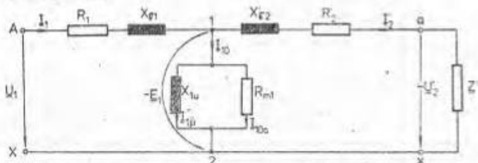


Figura 2.7. Schema echivalentă a transformatorului monofazat cu luarea în consideraţie a pierderilor în fier

Rezistența R_{m1} se determină din condiția ca pierderile prin această rezistență în cazul transformatorului monofazat să fie egale cu pierderile totale din miezul feromagnetic, adică

$$P_{Fe} = R_{m1} I_{10a}^2 = R_{m1} \left(\frac{E_1}{R_{m1}} \right)^2 = \frac{E_1^2}{R_{m1}},$$

de unde rezultă

$$R_{m1} = \frac{E_1^2}{P_{Fe}}. \tag{2.32}$$

Prin pierderile totale, în întreaga masă a miezului feromagnetic G_{Fe}, se înțeleg (v. și rel. (3.44))

$$P_{Fe} = p_{Fe} G_{Fe} \quad [\mathrm{W}].$$

Acestor pierderi, le corespunde componenta activă a curentului de funcționare în gol, notată cu I_{10a}, care are o valoare mică în raport cu componenta reactivă $I_{10r} = I_{1\mu}$ a curentului I_{10} de funcționare în gol. Dacă tensiunea de alimentare este constantă, atunci curentul de funcționare în gol este constant (vezi relația (2.5) și explicațiile aferente) avind valoarea

$$\underline{I}_{10} = \underline{I}_{10a} + \underline{I}_{10r} = \underline{I}_{10a} + \underline{I}_{1\mu}. \tag{2.33}$$

În continuare, se vor face citeva considerații cu privire la semnificația fizică a curentului I_{10} și a componentelor lui.

Cum s-a menționat, caracteristica de magnetizare a transformatorului este dependența dintre amplitudinea fluxului magnetic rezultant util Φ_m și amplitudinea curentului magnetizat

$$i_{10} = \frac{1}{w_1}(w_1 i_1 + w_2 i_2).$$

Curentul magnetizant i_{10} depinde de suma $w_1 i_1 + w_2 i_2$ și nu de i_1 și i_2 separat. De aceea, caracteristica de magnetizare referitoare la orice regim de funcționare în sarcină este practic identică cu caracteristica de funcționare în gol. Această caracteristică nu este liniară (fig. 2.2).

Datorită acestei neliniarități a caracteristicii de magnetizare a miezului, diferitele mărimi periodice (tensiuni, curenți, fluxuri magnetice) nu mai sint în general sinusoidale. În acest caz, curbele se descompun în sinusoide echivalente, numite *armonici* și, care datorită formei curbei, după cum se arată în continuare, sint de ordin impar, adică, 1, 3, 5, ... Dintre aceste armonici se iau în considerare *armonicile fundamentale* (de ordinul 1).

Ca urmare a *fenomenului de histerezis* caracteristica de magnetizare nu mai este reprezentată printr-o singură curbă ci printr-o buclă, așa cum se arată în figura 2.2.

Dacă fenomenul de histerezis nu ar avea loc, s-ar putea construi relativ ușor curba curentului magnetizant în raport cu timpul cind se cunoaște curba fluxului magnetizant în funcție de timp (fig. 2.8), determinind pe curba de magnetizare pentru fiecare valoare instantanee a fluxului magnetic φ (de exemplu φ') valoarea corespunzătoare a curentului i_{10} (de exemplu i_{10}'); așezind această valoare (i_{10}') a lui i_{10} pe aceeași ordonată cu a fluxului magnetic în funcție de timp (φ') rezultă curba curentului i_{10} în funcție de timp.

Această construcție, pentru cazul curbei considerată sinusoidală a fluxului magnetic util, este reprezentată detaliat în figura 2.8.

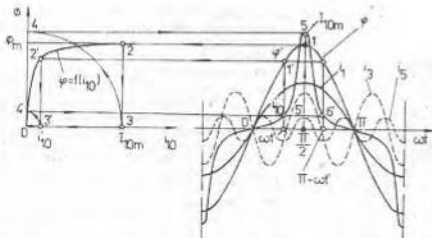


Figura 2.8. Determinarea grafică a curentului de funcționare în gol, în funcție de timp, $i_{10} = f(t)$, cînd este dată caracteristica de magnetizare a transformatorului $\varphi = f(i_{10})$ și variația în timp a fluxului util $\varphi = f(t)$, presupusă sinusoidală, și cînd nu se ia în considerație fenomenul de histerezis. Ordinea etapelor efectuate este indicată prin numere: 1–2–3–4–5 pentru amplitudinea curentului, 1'–2'–3'–4'–5' și 6' pentru un punct oarecare corespunzător unghiurilor $\omega t'$ și $\pi - \omega t'$ ș.a.m.d.

Se obține pentru curent o curbă *nesinusoidală* și cu atît mai ascuțită cu cît saturația miezului este mai mare.

Dar, se observă că punctele de zero și maximum al curbei curentului i_{10}, coincid cu punctele de zero și maximum ale sinusoidei fluxului magnetic util φ: cu alte cuvinte curentul de funcționare în gol i_{10} este, în cazul neglijării fenomenului de histerezis, în fază cu fluxul magnetic util.

Dacă însă are loc și fenomenul de histerezis, atunci tot pentru o variație sinusoidală în timp a fluxului magnetic util φ, se obține o curbă a curentului magnetizant i_{10} diferită de cea anterioară. Construcția curbei, indicată în figura 2.9 este ceva mai complicată datorită buclei de histerezis, din cauza

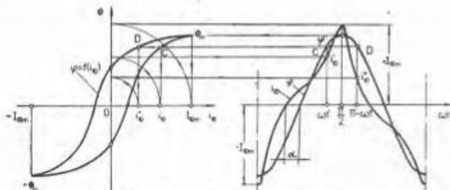


Figura 2.9. Idem ca în figura 2.8, dar cînd se ia în considerare fenomenul de histerezis.

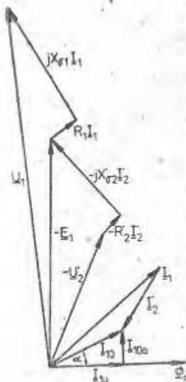


Figura 2.10. Diagrama de fazori a transformatorului monofazat cu mărimile secundare raportate la primar, cînd sînt luate în considerare pierderile în fier.

căreia pentru un flux magnetic (de exemplu φ') se obțin două valori pentru i_{10} (de exemplu i'_{10} și i''_{10}), dar construcția se face în mod similar ca cea din figura 2.8.

Din examinarea celor două curbe (v. fig. 2.8 și 2.9) se observă că în timp ce saturația magnetică, în cazul fluxului magnetic util sinusoidal, cînd nu există fenomenul de histerezis, conduce la o formă ascuțită a curbei curentului i_{10} fără a-i strica simetria, existența fenomenului de histerezis pe lîngă saturația magnetică, distruge simetria curentului i_{10}, curba curentului conținînd totuși *numai armonici de ordin impar* (datorită simetriei ciclului de histerezis). Dar, în acest al doilea caz, chiar dacă amplitudinile fluxului magnetic util Φ_m și curentului I_{om} coincid, totuși punctele de zero ale curbei fluxului magnetic φ și ale curbei curentului i_{10} sînt defazate unele față de altele cu unghiul α.

Deoarece curentul de funcționare în gol i_{10} este înaintea fluxului magnetic util φ, unghiul α se obișnuiește să se numească și *unghi de avans histerezis*.

Toate ecuațiile sistemului (2.29) rămîn valabile și pentru cazul în care se consideră pierderile în fier, cu singura deosebire că în ecuația de curenți, curentul I_{10} este dat de relația (2.33) adică

$$\underline{I}_{10} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_{10a} + \underline{I}_{10r}. \qquad (2.34)$$

Diagrama de fazori de asemenea, se completează în sensul relației (2.34), apărînd decalajul cu unghiul α între fluxul magnetic util Φ_m și curentul de funcționare în gol I_{10}, ca în figura 2.10.

Schema echivalentă din figura 2.7 cu $X_{1\mu}$ și R_{w1} în paralel, se mai poate transforma, luînd forma din figura 2.11 numită și *schema în T*, în care reactanța utilă $X_{1\mu}$ și rezistența R_{w1} sînt incluse într-o impedanță echivalentă $Z_m = R_m + jX_m$, a circuitului de magnetizare, unde [3]

$$\underline{Z}_m = \frac{E_1}{\underline{I}_{10}}; \; R_m = \frac{P_{Fe}}{I_{10}^2}; \; X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \qquad (2.34\,a)$$

Pentru simplificarea calculelor la regimul de funcționare în sarcină a transformatorului, se mai folosește și schema electrică echivalentă simplificată, cu *circuitul de magnetizare scos la borne*, numită și *schema în Γ*, reprezentată în figura 2.12.

Etapele calculelor necesare trecerii de la schema în T la cea în Γ sînt prezentate în diferite lucrări [3], [8].

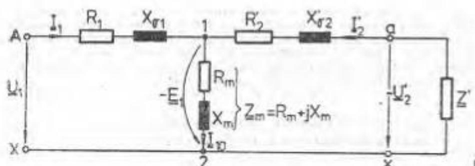


Figura 2.11. Schema echivalentă în T a transformatorului monofazat cu parametrii circuitului de magnetizare legați în serie.

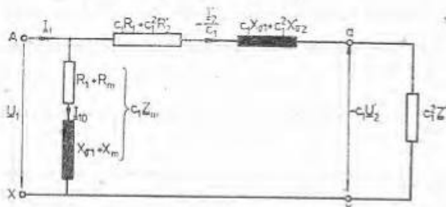


Figura 2.12. Schema echivalentă cu circuitul de magnetizare scos la borne — schema în Γ.

Avantajul schemei electrice echivalente în Γ din figura 2.12, în comparație cu schema în T din figura 2.11, constă în faptul că I_{10} nu mai depinde de sarcină simplificînd astfel calculele.

În calcule se folosesc de regulă notațiile:

$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{\sigma 1}$ — impedanța înfășurării primare; (2.35)

$\underline{Z}_2' = R_2' + jX_{\sigma 2}'$ — impedanța înfășurării secundare raportată la primar.

Coeficientul complex $\underline{c}_1$ din schema în Γ

$$\underline{c}_1 = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_m}{\underline{Z}_m} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_m}, \tag{2.35 a}$$

este denumit uneori *coeficient de corecție*. În cazul transformatoarelor de putere pentru care $R_1 \ll X_{\sigma 1}$, $\underline{c}_1$ se poate aproxima cu un număr real

$$c_1 \approx 1 + \frac{X_{\sigma 1}}{X_m} = 1,02 - 1,06.$$

În urma analizei ecuațiilor de funcționare, a schemelor echivalente și a diagramelor de fazori, se constată că s-a putut stabili, din aproape în aproape, teoria transformatorului monofazat, luîndu-se în considerare atît saturația circuitului magnetic cît și pierderile din miezul feromagnetic cu o foarte bună aproximație pentru cazurile practice. Ecuațiile stabilite permit, deci, studiul comportării în sarcină a transformatorului.

2.2. BILANȚUL PUTERILOR ȘI RANDAMENTUL TRANSFORMATORULUI MONOFAZAT [8]

2.2.1. BILANȚUL PUTERILOR

Pentru determinarea bilanțului de puteri se pleacă de la schema electrică echivalentă a transformatorului monofazat dată în figura 2.7 și reluată în figura 2.13.

Dacă AX se consideră bornele înfășurării primare care primește de la rețea puterea aparentă

$$\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1$$

și ax, bornele înfășurării secundare care debitează către consumator puterea aparentă

$$\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$$

se constată că, luînd în considerație pierderile din elementele transformatorului, se pot scrie relațiile

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{w1} + P_{Fe} + P_{w2} + P_2; \\ Q_1 &= Q_{\sigma1} + Q_m + Q_{\sigma2} + Q_2. \end{aligned} \tag{2.36}$$

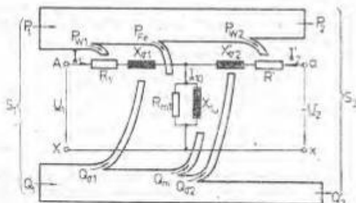


Figura 2.13. Reprezentarea schematică a bilanțului de puteri active și reactive la transformator.

unde:

$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ — puterea activă primită de la rețea;
$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ — puterea activă transmisă circuitului receptor;
$P_{w1} = R_1 I_1^2$ — pierderile de putere activă în înfășurarea primară;
$P_{Fe} = R_{m1} I_{10a}^2$ — pierderile de putere activă în miezul feromagnetic;
$P_{w2} = R_2 I_2^2 = R_2' I_2'^2$ — pierderile de putere activă în înfășurarea secundară.;
$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1$ — putere reactivă primită de la rețea;
$Q_2 = U_2 I_2 \sin \varphi_2$ — putere reactivă transmisă circuitului receptor;
$Q_{\sigma 1} = X_{\sigma 1} I_1^2$ — pierderea de putere reactivă necesară producerii cîmpului magnetic de scăpări al înfășurării primare;
$Q_m = X_{1m} I_{1\mu}^2$ — pierderea de putere reactivă necesară magnetizării miezului feromagnetic;
$Q_{\sigma 2} = X_{\sigma 2} I_2^2 = X_{\sigma 2}' I_2'^2$ — pierderea de putere reactivă necesară producerii cîmpului magnetic de scăpări al înfășurării secundare.

La funcționarea în sarcină a transformatorului, în afară de pierderile în părțile active — în miezul feromagnetic și în înfășurări denumite *pierderi principale*, se mai produc și *pierderi suplimentare*, în cuvă, în piesele de consolidare și în înfășurări. Pierderile active au un rol important asupra duratei de viață a transformatorului deoarece ele se transformă în căldură care poate conduce la încălziri ce depășesc limitele admise de clasele de izolație folosite pentru înfășurări. În asemenea cazuri, proprietățile fizice și chimice ale materialelor electroizolante se înrăutățesc și durata de viață a transformatorului se poate reduce simțitor.

Pierderile influențează negativ și randamentul transformatorului, reducînd transferul de putere către secundar.

Relațiile (2.36) ne arată că transformatorul primește de la rețea puterea care să acopere atît pierderile de putere interne cît și puterea pe care o dă receptorului. Bilanțurile de puteri active și reactive ale transformatorului sînt redate într-un mod sugestiv în figura 2.13.

2.2.2. RANDAMENTUL TRANSFORMATORULUI MONOFAZAT

În general, randamentul este definit de raportul dintre puterea activă cedată și puterea activă primită.

Deci, în cazul transformatorului

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1}. \tag{2.37}$$

Ținînd cont de relația (2.36), care dă bilanțul puterilor active, se obține

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{w1} + P_{w2} + P_{Fe}} \tag{2.38}$$

unde:

P_{w1} și P_{w2} sînt pierderile în înfășurări pentru curenții I_1 și I_2, iar P_{Fe} sînt pierderile în miezul feromagnetic.

Randamentul se poate exprima și în (%) dacă relația (2.38) se înmulțește cu 100.

2.3. REGIMURILE DE FUNCȚIONARE ALE TRANSFORMATORULUI MONOFAZAT [5, 8]

În scopul clarificării fenomenelor din transformator și a scoaterii în evidență a aspectelor practice din cadrul teoriei transformatorului, se vor analiza regimurile de funcționare în gol, în scurtcircuit și în sarcină. La baza analizei vor sta ecuațiile, schemele echivalente și diagramele de fazori stabilite. Pentru cazurile analizate, se vor lua în considerație numai regimurile permanente de lucru.

2.3.1. REGIMUL DE FUNCȚIONARE ÎN GOL

Acest regim se realizează cînd la bornele înfășurării secundare nu este conectat nici un consumator, adică impedanța de sarcină este infinită. În acest caz $I_2 = 0$ și $I_1 = I_{10}$, iar ecuațiile de funcționare ale transformatorului din relațiile (2.29), avînd în vedere și relațiile (2.34 a) și (2.35) devin:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{Z}_1 \underline{I}_{10} - \underline{E}_1; \\ -\underline{U}_2' &= -\underline{E}_1; \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_{10}; \\ \underline{E}_1 &= -\underline{Z}_m \underline{I}_0. \end{aligned} \qquad (2.39)$$

Diagrama de fazori și schema echivalentă corespunzătoare acestui regim sînt date în figura 2.14, iar schema electrică pentru încercarea la funcționarea în gol a transformatorului monofazat este prezentată în figura 2.15.

În schema din figura 2.15 tensiunea U_1 din primar se măsoară cu voltmetrul V_1, curentul cu ampermetrul A și puterea absorbită cu wattmetrul W, iar în secundar, tensiunea cu voltmetrul V_2. Frecvența rețelei de alimentare se consideră constantă și egală cu valoarea pentru care a fost construit transformatorul.

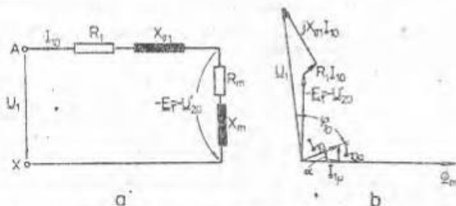


Figura 2.14. Schema echivalentă (a) și diagrama de fazori (b), la funcționarea în gol a transformatorului.

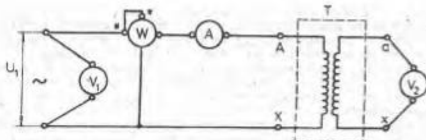


Figura 2.15. Schema de montaj la funcționarea în gol a transformatorului.

Transformatorul se alimentează cu o tensiune U_1 variabilă între zero și 1,15 U_{1N}, iar măsurătorile care se fac se trec într-un tabel, pe baza cărora se construiesc curbele $I_{10} = f(U_1)$, $P_{10} = f(U_1)$ și $\cos \varphi_{10} = f(U_1)$.

Curbele respective, a căror formă de variație este dată în figura 2.16, se numesc *caracteristici de funcționare în gol.*

Pe baza măsurătorilor efectuate la încercarea de funcționare în gol se pot determina următoarele mărimi caracteristice ale transformatorului:

Raportul de transformare, definit prin datele nominale ale transformatorului

$$k = \frac{U_{1N}}{U_{20}}.$$

Dacă se consideră $I_{10} \ll I_{1N}$ atunci $U_1 \approx E_1$ și

$$k = \frac{U_{1N}}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \qquad (2.40)$$

Curentul la funcționarea în gol, pentru o tensiune de alimentare egală cu cea nominală U_{1N}, se poate determina în valoare absolută, sau în valoare relativă prin raportare la curentul nominal din primar, sau în procente față de curentul nominal din primar. În general, curentul de funcționare în gol, la transformatoarele normale de putere, are valoarea

$$I_{10} \leqslant (1,5 - 3\%) I_{1N}$$

sau, în multe cazuri, chiar

$$I_{10} \leqslant 1\%\ I_{1N}.$$

Forma curentului de funcționare în gol, datorită faptului că transformatorul în acest regim se comportă ca o bobină cu miez de fier saturat, nu mai are o variație sinusoidală în timp. Considerînd că transformatorul este ali-

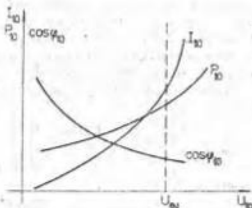


Figura 2.16. Caracteristicile de funcționare în gol, ale transformatorului.

mentat cu o tensiune sinusoidală, și neglijind impedanța înfășurării primare, rezultă că fluxul magnetic este sinusoidal (conform relației (2.14)). Din expresia fluxului magnetic ($\Phi = BS$) se deduce că și inducția magnetică va avea o variație sinusoidală în timp. Din legea circuitului magnetic se determină $H = f(I_\mu)$, iar dependența $B = f(H)$ — caracteristica de magnetizare — este cunoscută pentru materialul utilizat în construcția miezului magnetic. Din aceste funcții se poate determina curba de variație în timp a curentului de magnetizare.

În practică, cum s-a menționat în paragraful 2.1.3, curba de variație a curentului magnetizant (de funcționare în gol) i_{10} se determină grafic, așa cum se procedează în figurile 2.8 și 2.9, considerînd cunoscute atît caracteristica de magnetizare $\varphi = f(i_{10})$ a miezului feromagnetic al transformatorului, cît și forma în timp, considerată sinusoidală, a fluxului magnetic util φ.

Pe baza figurii 2.9 se poate deduce că forma finală $i_{10} = f(t)$, se obține din suprapunerea curbei curentului de magnetizare $i_{1\mu} = f(t)$ în fază cu fluxul magnetic util φ (reprezentat în figura 2.8 de însăși curentul de funcționare în gol $i_{10}(t)$) și a curbei curentului activ $i_{10a} = f(t)$, defazată cu $\frac{\pi}{2}$ înaintea lui $i_{1\mu}$ și care, în unele lucrări [8] se consideră sinusoidală. Reprezentarea separată însă, în valori instantanee, a lui $i_{1\mu}(t)$ și $i_{10a}(t)$, este extrem de dificilă deoarece pe parcursul unei perioade atît pierderile în fier cît și saturația magnetică sînt variabile, ca urmare a variației în timp, presupusă sinusoidală, a fluxului magnetic util $\varphi(t)$.

Din figurile 2.8 și 2.9 se observă deci, că atît curentul de magnetizare, cît și curentul de funcționare în gol, conțin în afară de armonica fundamentală și numeroase armonici de ordin superior, printre care mai importante armonica de ordinul 3, în opoziție de fază cu fundamentala și armonica de ordinul 5, în fază. În cazul unei table puternic aliată și laminată la cald (care nu se mai folosește), la o inducție $B = 1{,}4$ T, amplitudinea armonicii 3 reprezintă 30% din amplitudinea fundamentală, iar amplitudinea armonicii de ordinul 5, reprezintă 15% din amplitudinea fundamentalei.

Rezultă, din construcția grafică efectuată că, valoarea eficace a curentului de funcționare în gol se determină destul de greu. De aceea, în cursul de măsurări electrice sînt prezentate o serie de alte metode mai adecvate. În cadrul măsurătorilor efectuate cu schema din figura 2.15, valorile citite la aparate se consideră, în general, valori eficace.

Pierderile la funcționarea în gol a transformatorului, măsurate (fig. 2.14 a) vor fi

$$P_{10} = (R_1 + R_m)I_{10}^2 = R_1 I_{10}^2 + R_m I_{10}^2 = P_{w10} + P_{Fe}. \qquad (2.41)$$

Deoarece

$$R_1 \ll R_m,$$

rezultă că

$$P_{w10} \ll P_{Fe}$$

și deci,

$$P_{10} \approx P_{Fe} = R_m I_{10}^2. \qquad (2.42)$$

Aceasta înseamnă că la funcționarea în gol, pierderile sînt practic egale cu pierderile în fier.

Factorul de putere la funcționarea în gol se determină cu relația

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{U_1 I_{10}} \tag{2.43}$$

și depinde de gradul de saturație al transformatorului, deoarece odată cu creșterea gradului de saturație, curentul de funcționare în gol crește și deci factorul de putere scade.

Parametrii de funcționare în gol a transformatorului se determină cu relațiile :

— impedanța de funcționare în gol

$$Z_{10} = \frac{U_1}{I_{10}} \text{ sau } Z_{10} = k\frac{U_{20}}{I_{10}} \ [\Omega]; \tag{2.44}$$

— rezistența la funcționarea în gol

$$R_{10} = Z_{10} \cos \varphi_0 \text{ sau } R_{10} = \frac{P_{10}}{I_{10}^2} \ [\Omega]; \tag{2.44 a}$$

— reactanța la funcționarea în gol

$$X_{10} = Z_{10} \sin \varphi_0 \text{ sau } X_{10} = \sqrt{Z_{10}^2 - R_{10}^2} \ [\Omega]. \tag{2.44 b}$$

Dar, în conformitate cu figurile 2.12 și 2.14

$$\begin{aligned} R_{10} &= R_1 + R_m \\ X_{10} &= X_{\sigma 1} + X_m ; \end{aligned} \tag{2.45}$$

de unde rezultă parametrii circuitului de magnetizare (pentru cazul legării lor în serie)

$$\begin{aligned} R_m &= R_{10} - R_1 \ [\Omega]; \\ X_m &= X_{10} - X_{\sigma 1} \ [\Omega]. \end{aligned} \tag{2.46}$$

2.3.2. REGIMUL DE FUNCȚIONARE ÎN SCURTCIRCUIT

Regimul de funcționare în scurtcircuit este caracterizat prin $U_2 = 0$ și se obține cînd bornele secundarului transformatorului se conectează în scurtcircuit, valoarea impedanței circuitului de sarcină fiind $Z = 0$. În acest caz, alimentarea înfășurării primare se face cu o tensiune variabilă U_{1k} și mult mai mică decît tensiunea nominală U_{1N}. Ecuațiile de funcționare devin :

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1k} &= \underline{Z}_1 \underline{I}_1 - \underline{E}_{1k} ; \\ 0 &= \underline{Z}_2' \underline{I}_2' - \underline{E}_{1k} ; \\ \underline{I}_1 + \underline{I}_2' &= \underline{I}_{10} ; \\ \underline{E}_{1k} &= -\underline{Z}_m \underline{I}_{10} . \end{aligned} \tag{2.47}$$

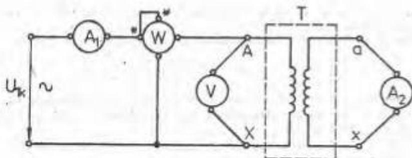


Figura 2.17. Schema de montaj la funcționarea în scurtcircuit a transformatorului monofazat.

În cazul cînd bornele înfășurării secundare sînt scurtcircuitate, iar înfășurarea primară este alimentată la tensiunea nominală, regimul de scurtcircuit reprezintă un *regim de avarie* caracterizat prin curenți foarte mari.

De aceea, înfășurarea primară se alimentează de la o sursă de tensiune reglabilă astfel încît curenții prin înfășurări să nu depășească 10—20% peste curenții nominali, ceea ce constituie *scurtcircuitul de probă*. Acest regim nu este dăunător pentru transformator. Schema pentru realizarea probei de scurtcircuit este prezentată în figura 2.17.

Tensiunea de alimentare a transformatorului U_{1k}, se măsoară cu voltmetrul V, curenții prin cele două înfășurări cu ampermetrele A_1 și A_2, iar cu wattmetrul W se măsoară puterea absorbită de transformator la scurtcircuit P_k.

Cu rezultatele obținute se formează un tabel și se trasează caracteristicile la funcționarea în scurtcircuit $I_{1k} = f(U_{1k})$, $P_k = f(U_{1k})$ și $\cos \varphi_k = f(U_{1k})$, caracteristici a căror alură este reprezentată în figura 2.18.

Deoarece, în timpul experienței, temperatura înfășurărilor poate varia, pentru a preîntîmpina erorile de măsură, experiența se începe cu valoarea maximă a tensiunii U_{1k} corespunzătoare unor curenți cu 10—20% peste cei nominali, care se micșorează treptat, ținînd transformatorul sub tensiune doar în timpul efectuării experienței.

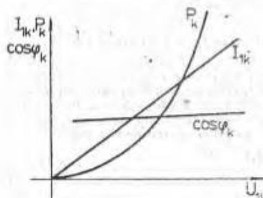


Figura 2.18. Forma caracteristicilor de funcționare în scurtcircuit a transformatorului.

Tensiunea de scurtcircuit nominală este tensiunea care trebuie aplicată înfășurării primare cînd secundarul este în scurtcircuit pentru a obține în înfășurări curenții nominali. Această tensiune este cuprinsă între limitele:

$$U_{k1N} = (5-15)\%\,U_{1N}\ [\text{V}] \quad \text{sau}$$

$$u_{kN} = \frac{U_{k1N}}{U_{1N}} 100 = 5-15\%.$$

La această probă, curentul de funcționare în gol I_{10} este practic neglijabil, deoarece tensiunea $U_{1kN} \ll U_{1N}$ și deci fluxul magnetic util prin miezul feromagnetic este foarte mic.

Rezultă astfel că ecuația a 3-a din relațiile (2.47) devine:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2' \approx 0, \text{ adică } \underline{I}_1 = -\underline{I}_2'.$$

Dacă se scad primele două ecuații din relațiile (2.47) și se ține cont de relația de mai sus ($\underline{I}_1 = -\underline{I}_2'$) se obține

$$\underline{U}_{1k} = \underline{Z}_1\underline{I}_1 - \underline{Z}_2'\underline{I}_2' = (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2')\underline{I}_1 = \underline{Z}_k\underline{I}_1, \tag{2.48}$$

în care s-a notat cu

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2' = R_k + jX_k$$

și se numește *impedanță de scurtcircuit*, unde:

$$R_k = R_1 + R_2'; \tag{2.48 a}$$

$$X_k = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}'.$$

Conform acestei relații rezultă schema echivalentă a transformatorului la funcționarea în scurtcircuit, reprezentată în figura 2.19 și diagrama de fazori corespunzătoare, reprezentată în figura 2.20.

Solenația rezultantă a transformatorului la funcționarea de încercare (cu tensiune redusă) în scurtcircuit de probă (deoarece fluxul magnetic este mic și deci circuitul magnetic este nesaturat) va fi

$$\underline{F}_\mu = w_1\underline{I}_{1k} + w_2\underline{I}_{2k} = w_1\underline{I}_{10} \approx 0,$$

din care se obține

$$\frac{I_{1k}}{I_{2k}} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}; \tag{2.49}$$

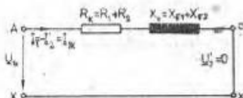


Figura 2.19. Schema echivalentă a transformatorului monofazat, la funcționarea în scurtcircuit.

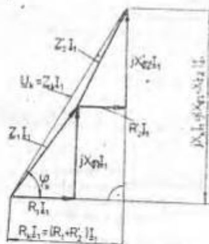


Figura 2.20. Diagrama de fazori la funcționarea în scurtcircuit a transformatorului.

adică raportul curenţilor este invers proporţional cu raportul de transformare. Din încercarea de funcţionare în scurtcircuit a transformatorului, se pot determina următoarele mărimi caracteristice :

Pierderile în înfăşurări (de scurtcircuit)

$$P_w = R_k I_{1k}^2 = R_1 I_{1k}^2 + R_2' I_{2k}'^2 = P_{w1} + P_{w2} \qquad (2.50)$$

Pentru $I_{1k} = I_{1N}$ se obţin pierderile de scurtcircuit nominale P_{kN}, care se calculează corespunzător valorii rezistenţei de scurtcircuit R_k la temperatura standard de 75°C, pentru clasa de izolaţie A sau de 115°C, pentru clasa de izolaţie F.

Pierderile măsurate sînt mai mari decît pierderile din înfăşurări calculate cu relaţia (2.50), deoarece apar şi pierderi suplimentare în înfăşurări, determinate de cîmpul magnetic de scăpări care produce fenomenul de refulare a curentului în conductoare, precum şi pierderile din miezul feromagnetic.

În general, la transformatorul monofazat

$$P_k = U_{1k} I_{1k} \cos \varphi_k \approx P_w \qquad (2.51)$$

deoarece pierderile în fier se neglijează, acestea fiind proporţionale cu pătratul tensiunii de alimentare U_{1k} care la proba de scurtcircuit este mică ((5—15%)U_{1N}).

La funcţionarea în scurtcircuit de probă, transformatorul fiind alimentat la o tensiune redusă, miezul feromagnetic al acestuia nu este saturat şi deci curentul absorbit are o variaţie liniară — în raport cu U_{1k}, ceea ce înseamnă o impedanţă de scurtcircuit constantă şi un factor de putere constant (fig. 2.18).

Factorul de putere la funcţionarea în scurtcircuit, se determină, pe baza datelor experimentale, din relaţia (2.51)

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_{1k} I_{1k}}.$$

Parametrii de scurtcircuit ai transformatorului :

— impedanţa de scurtcircuit

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} \, [\Omega];$$

— rezistenţa de scurtcircuit

$$R_k = Z_k \cos \varphi_k \text{ sau } R_k = \frac{P_k}{I_{1k}^2} \, [\Omega]; \qquad (2.52)$$

— reactanţa de scurtcircuit

$$X_k = Z_k \sin \varphi_k \text{ sau } X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \, [\Omega].$$

Componentele tensiunii de scurtcircuit se pot determina ca şi tensiunea de scurtcircuit în valori absolute, în valori relative sau în procente.

Componenta activă a tensiunii de scurtcircuit :

— în valoare absolută

$$U_{ka} = R_k I_{1N} \, [\text{V}];$$

— în procente

$$u_{ka} = \frac{U_{ka}}{U_{1N}} 100 = \frac{R_k I_{1N}}{U_{1N}} \cdot \frac{I_{1N}}{I_{1N}} 100 = \frac{P_k}{S_N} 100 \, [\%]. \qquad (2.53)$$

Componenta reactivă a tensiunii de scurtcircuit :
— în valoare absolută

$$U_{kr} = X_k I_{1N} = \sqrt{U_{1k}^2 - U_{ka}^2}\ [V];$$

— în procente

$$u_{kr} = \frac{U_{kr}}{U_{1N}} 100 = \sqrt{\left(\frac{U_k}{U_{1N}}\right)^2 - \left(\frac{U_{ka}}{U_{1N}}\right)^2} 100 = \sqrt{u_k^2 - u_{ka}^2}\ [\%], \qquad (2.54)$$

unde :

$U_k = U_{1k}$ — tensiunea de scurtcircuit măsurată, în valoare absolută, adică în V ;

u_k — tensiunea de scurtcircuit, în procente.

2.3.3. REGIMUL DE FUNCȚIONARE ÎN SARCINĂ

Se realizează atunci cînd primarul este alimentat de la tensiunea $U_1 = U_{1N} =$ const., iar impedanța de sarcină $Z' \neq 0$, adică $0 < Z' < \infty$. În aceste condiții interesează cum variază curenții I_1 și I_2' și tensiunea U_2', la sarcina Z' variabilă.

Admițînd ipotezele care au stat la baza schemei echivalente din figura 2.19 pentru regimul de funcționare în scurtcircuit, ca și ipoteza că $c_1 \approx 1$ (adică $Z_1 \ll Z_m$), se poate considera că schema reprezentată în figura 2.21 este valabilă în practică cu suficientă aproximație și pentru regimul de funcționare în sarcină ; această schemă poartă denumirea de *schema simplificată Kapp*, în care :

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{1e} &= \underline{Z}_k = R_k + jX_k ; \\ R_{1e} &= R_k = R_1 + R_2' ; \\ X_{1e} &= X_k = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}, \end{aligned} \qquad (2.55)$$

reprezintă impedanța echivalentă, respectiv rezistența și reactanța echivalente, corespunzătoare.

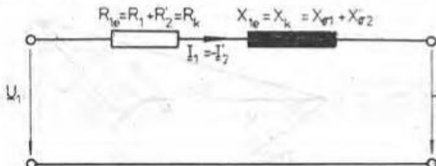


Figura 2.21. Schema echivalentă simplificată (schema Kapp) a transformatorului (în ipoteza $I_{10} \approx 0$).

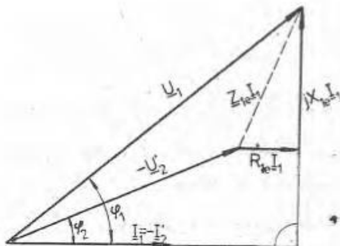


Figura 2.22. Diagrama de fazori simplificată (Kapp) a transformatorului.

Aplicînd teorema a 2-a a lui Kirchhoff în schema Kapp, se obține ecuația tensiunilor

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_{1e}\underline{I}_1 - \underline{U}'_2 \tag{2.56}$$

iar în figura 2.22 este reprezentată diagrama de fazori corespunzătoare (diagrama Kapp).

Unghiul φ_2 dintre fazorii $\underline{U}'_2$ și $\underline{I}'_2$, este unghiul al cărui cosinus reprezintă factorul de putere al sarcinii, iar unghiul φ_1 dintre fazorii $\underline{U}_1$ și $\underline{I}_1$, determină factorul de putere al transformatorului în raport cu rețeaua electrică de alimentare.

La funcționarea în sarcină a transformatorului prezintă importanță următoarele caracteristici (vezi și paragraful 3.6):

a. *Variația tensiunii secundare în funcție de sarcină*, reprezintă variația tensiunii la bornele înfășurării secundare, cînd sarcina variază de la zero (funcționarea în gol) la sarcină nominală.

Pentru aceasta se va folosi diagrama Kapp din figura 2.22, în care se consideră $\underline{I}_1 = -\underline{I}'_2$ și $\underline{U}_1 = \underline{U}_{1N} = -\underline{U}'_{20}$, completată cu unele construcții ajutătoare, cum se arată în figura 2.23.

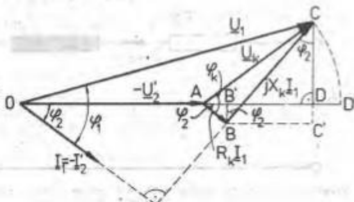


Figura 2.23. Utilizarea diagramei Kapp în determinarea variației tensiunii secundare.

Prin variația tensiunii la bornele înfășurării secundare în raport cu încărcarea se înțelege

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2. \tag{2.57}$$

Dacă această relație se înmulțește cu raportul de transformare k, se obține variația de tensiune din secundar, raportată la primar, adică

$$\Delta U_2' = U_{20}' - U_2' = U_1 - U_2'. \tag{2.58}$$

Din figura 2.23 se obține

$$\Delta U_2' = \overline{OC} - \overline{OA} = \overline{OD'} - \overline{OA} = \overline{AD'}.$$

Cu destulă precizie se poate considera $\overline{DD'} \approx 0$, rezultînd

$$\Delta U_2' \approx \overline{AD} = \overline{AB'} + \overline{B'D}.$$

Din triunghiul dreptunghic ABB'

$$\overline{AB'} = \overline{AB} \cos \varphi_2 = U_{ka} \cos \varphi_2,$$

iar din triunghiul dreptunghic BCC'

$$\overline{BC'} = \overline{B'D} = \overline{BC} \sin \varphi_2 = U_{kr} \sin \varphi_2.$$

Se obține astfel, în final

$$\Delta U_2' = U_{ka} \cos \varphi_2 + U_{kr} \sin \varphi_2. \tag{2.59}$$

Pentru o apreciere mai corectă, se obișnuiește ca variația de tensiune să se calculeze în unități relative, sau în procente din tensiunea nominală. Rezultă astfel

$$\Delta u_2' = \frac{U_{2N}' - U_2'}{U_{2N}'} 100 = \frac{U_1 - U_2'}{U_1} 100 = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} 100 = \Delta u_2 \; [\%]. \tag{2.59 a}$$

Cum se observă, în procente nu mai este cazul să se lucreze cu mărimi secundare raportate la primar, deoarece comparația se face în raport cu valorile tensiunilor nominale.

În continuare, se exprimă căderea de tensiune Δu_2 în procente, în funcție de componentele tensiunii de scurtcircuit.

Pornind de la relația (2.59), se obține

$$\Delta u_2 = \frac{\Delta U_2'}{U_{1N}} 100 = \frac{U_{ka}}{U_{1N}} 100 \cos \varphi_2 + \frac{U_{kr}}{U_{1N}} 100 \sin \varphi_2,$$

sau

$$\Delta u_2 = \frac{R_k I_1}{U_{1N}} 100 \cos \varphi_2 + \frac{X_k I_1}{U_{1N}} 100 \sin \varphi_2,$$

sau încă, prin înmulțire și împărțire cu I_{1N}

$$\Delta u_2 = \frac{R_k I_{1N}}{U_{1N}} \frac{I_1}{I_{1N}} 100 \cos \varphi_2 + \frac{X_k I_{1N}}{U_{1N}} \frac{I_1}{I_{1N}} 100 \sin \varphi_2. \tag{2.59 b}$$

Dacă valoarea relativă a sarcinii secundare se notează cu

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{I_2}{I_{2N}}$$

atunci, relația (2.59 b) devine

$$\Delta u_2 = \beta (u_{ka} \cos \varphi_2 + u_{kr} \sin \varphi_2) \; [\%]. \tag{2.60}$$

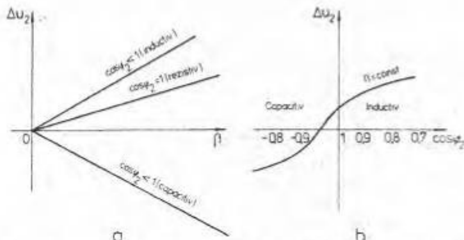


Figura 2.24. Variația tensiunii secundare în funcție de sarcină la U_1 = const. și $\cos\varphi_2$ = const. (a) și în funcție de caracterul sarcinii ($\cos\varphi_2$) la U_1 = const. și β = const. (b).

unde u_{ka} și u_{kr} sînt componentele activă și reactivă ale tensiunii de scurtcircuit nominale în procente, date de relațiile (2.53) și (2.54).

În cazul în care nu se neglijează segmentul $\overline{DD'}$ din figura 2.23, se poate deduce pentru variația tensiunii secundare [8], valoarea exactă, dată de relația (3.51 a).

Relația (2.60) sau (3.51 a) permite determinarea variației tensiunii secundare pe cale analitică la sarcină variabilă (I_2 variază ca mărime prin intermediul lui β, iar defazajul φ_2 și tensiunea U_1 se mențin constante). Figura 2.24 a reprezintă $\Delta u_2 = f(\beta)$ în condițiile U_1 = const., $\cos\varphi_2$ = const., iar figura 2.24 b reprezintă $\Delta u_2 = f(\cos\varphi_2)$ în condițiile U_1 = const. și β = const.

Cum se observă, din figura 2.24, căderea de tensiune Δu_2 este pozitivă (la sarcină rezistivă sau inductivă), sau poate fi negativă (la sarcină capacitivă cînd $\varphi_2 < 0$); în cazul în care $\Delta u_2 > 0$, tensiunea la bornele secundare ale transformatorului la funcționarea în sarcină, este mai mică decît la funcționarea în gol ($U_2 < U_{20}$). În cazul în care $\Delta u_2 < 0$, tensiunea la bornele secundare ale transformatorului la funcționarea în sarcină, este mai mare decît la funcționarea în gol ($U_2 > U_{20}$).

Dependența $U_2 = f(I_2)$ cînd U_1 = const. și $\cos\varphi_2$ = const., reprezintă *caracteristica externă* a transformatorului și este reprezentată în figura 2.25.

b. *Caracteristica randamentului* reprezintă dependența $\eta = f(P_2)$ sau $\eta = f(\beta)$, în condițiile U_1 = const. și $\cos\varphi_2$ = const. și se determină, pe baza rezultatelor obținute la încercările de funcționare în gol și în scurtcircuit.

Puterea aparentă utilă a transformatorului monofazat este

$$S_2 = U_{2N} I_2 = U_{2N} I_{2N} \frac{I_2}{I_{2N}} = \beta S_N. \tag{2.61}$$

Pentru pierderile din înfășurări se poate obține o relație de aceeași formă:

$$P_w = R_1 I_1^2 = R_1 I_{1N}^2 \left(\frac{I_1}{I_{1N}}\right)^2 = \beta^2 P_{1N}. \tag{2.62}$$

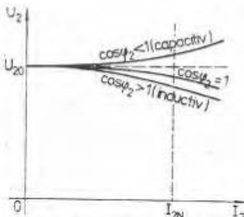


Figura 2.25. Caracteristicile externe $U_2 = f(I_2)$ la U_1 = const. și $\cos\varphi_2$ = const. (dar cu caractere diferite: rezistiv, inductiv și capacitiv).

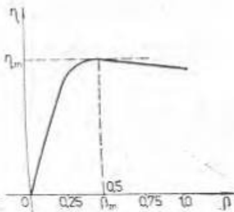


Figura 2.26. Caracteristica randamentului unui transformator.

Pierderile în fier, cum s-a arătat mai sus, nu depind de mărimea sarcinii, ci numai de tensiunea de alimentare. În acest caz se obține pentru randament expresia:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} = \frac{\beta S_N \cos\varphi_2}{\beta S_N \cos\varphi_2 + \beta^2 P_{kN} + P_{Fe}}. \tag{2.63}$$

La factor de putere constant ($\cos\varphi_2$ = const.) și tensiune secundară practic constantă ($U_2 \approx$ const.) se constată că $\eta = f(\beta)$ prezintă un maxim, care se obține rezolvînd ecuația

$$\frac{d\eta}{d\beta} = 0, \tag{2.64}$$

din care rezultă că valoarea maximă a randamentului se obține cînd pierderile din înfășurări sînt egale cu pierderile din miezul feromagnetic, cu alte cuvinte, cînd pierderile variabile (din înfășurări) sînt egale cu pierderile constante (din fier), adică

$$\beta_m^2 P_{kN} = P_{Fe}$$

de unde

$$\beta_m = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{kN}}}. \tag{2.65}$$

În general β_m = 0,4—0,75, avînd valori mai mici la transformatoarele de distribuție care lucrează un timp mai mare la sarcini reduse și valori mai mari la transformatoare construite pentru a lucra la sarcini apropiate de sarcina nominală.

Avînd pierderile în fier determinate din încercarea de funcționare în gol și pierderile în înfășurări determinate din încercarea de funcționare în scurtcircuit pentru $I = I_N$ (adică pentru β = 1), se poate determina caracteristica randamentului cu relația (2.63), dînd diferite valori lui β (deci curentului). Caracteristica randamentului pentru un transformator, este reprezentată în figura 2.26.

Cum se observă și din figură, la transformatoarele mari după trecerea valorii maxime randamentul variază foarte puțin cu sarcina.

2.4. TRANSFORMATORUL TRIFAZAT

2.4.1. CONSTITUIREA SCHEMELOR TRIFAZATE DE TRANSFORMARE

Un sistem trifazat simetric de tensiuni se caracterizează prin aceea că amplitudinile tensiunilor celor trei faze sînt egale între ele, iar defazajul între aceste tensiuni este de $2\pi/3$ radiani sau 120° electrice (fig. 2.27). De aceea, suma valorilor instantanee a tensiunilor unui sistem simetric trifazat este nulă, sau în complex

$$\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C = 0. \tag{2.66}$$

Transformarea, în cazul curentului alternativ trifazat, a parametrilor energiei electrice (tensiunea, curentul, iar alteori, numărul de faze) se poate face cu ajutorul a trei transformatoare monofazate identice (fig. 2.28) sau cu un singur transformator trifazat, care are un miez feromagnetic unic (fig. 2.29).

Modul de conectare a capetelor înfășurărilor se poate face în stea, în triunghi sau în zigzag. În cazul figurilor 2.28 și 2.29 înfășurările primare și secundare sînt conectate în stea.

La capetele înfășurărilor primare *A*, *B*, *C* se poate aplica un sistem de tensiuni trifazate, iar la capetele înfășurărilor secundare *a*, *b*, *c* se poate conecta un receptor trifazat corespunzător tensiunii secundare transformate.

În figura 2.28 înfășurările primare și secundare corespunzătoare fiecărei faze se dispun pe miezuri distincte, fiecărei faze corespunzîndu-i un transformator monofazat compact. Schema respectivă de transformare a curentului alternativ se întîlnește deseori și în practică, în cazul unei unități de mare și foarte mare putere, sau în cazul cînd exploatarea sistemului energetic impune o asemenea soluție din motive tehnico-economice.

În figura 2.29, însă, înfășurările primare și secundare corespunzătoare fiecărei faze, sînt dispuse pe cîte o coloană a transformatorului, miezul feromagnetic fiind prevăzut cu trei coloane.

Transformatorul trifazat, de această construcție, se întîlnește în mod curent în practică, asigurînd o importantă economie de material feromagnetic și un gabarit redus, pentru aceeași putere transformată, față de sistemul constituit din trei transformatoare monofazate.

În figurile 2.30 și 2.31 se reprezintă diverse forme constructive de miezuri feromagnetice pentru transformatoare trifazate (întîlnite în practică mai rar).

Transformatorul trifazat bloc (cu miez feromagnetic unic) nu este competitiv la puteri mari unde intervine problema transportului și la stațiile de transformare, unde un transformator trifazat de rezervă nu este economic, față de un singur transformator monofazat, în cadrul grupului transformatoric format din trei transformatoare monofazate.

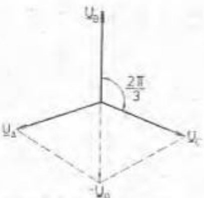


Figura 2.27. Sistem trifazat de tensiuni, simetric și echilibrat.

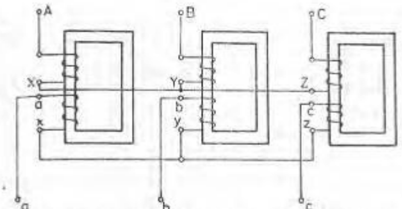


Figura 2.28. Schemă de transformare în curent alternativ trifazat, constituită din trei transformatoare monofazate identice.

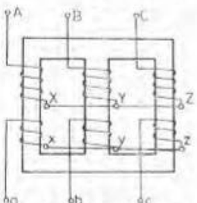


Figura 2.29. Schemă de transformare în curent alternativ trifazat, utilizînd un sistem magnetic unic cu trei coloane.

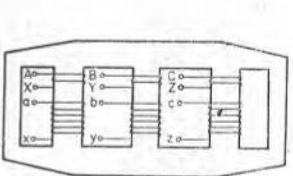


Figura 2.30. Schema unui transformator trifazat cu miezul feromagnetic unic cu cinci coloane.

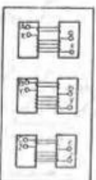


Figura 2.31. Schema unui transformator trifazat cu miezul feromagnetic în manta.

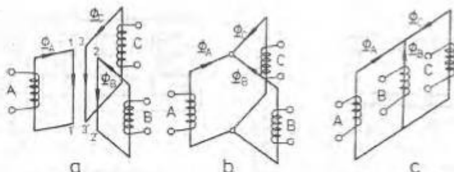


Figura 2.32. Constituirea transformatorului trifazat cu trei coloane din trei transformatoare monofazate.

Posibilitatea utilizării pentru transformatoarele trifazate a miezurilor cu trei coloane de forma celor din figura 2.29 reiese din analiza schemelor prezentate în figura 2.32.

În adevăr, dacă se consideră trei transformatoare monofazate dispuse ca în figura 2.32 a, atunci coloanele 1—1', 2—2' și 3—3' se pot contopi din punct de vedere constructiv într-o singură coloană prin care trece suma fluxurilor Φ_A, Φ_B și Φ_C. Însă, în sistemul trifazat simetric, suma fazorială a fluxurilor magnetice utile a celor trei faze este nulă, adică

$$\underline{\Phi}_A + \underline{\Phi}_B + \underline{\Phi}_C = 0 \tag{2.67}$$

deoarece cele trei fluxuri sînt simetrice și decalate cu 120° între ele, similar cu sistemul de tensiuni reprezentat în figura 2.27.

În acest caz, contopirea celor trei coloane în una singură nu mai prezintă interes și, ca atare, sistemul magnetic ar putea arăta ca cel din figura 2.32 b, constituit din trei coloane bobinate și șase juguri. Această construcție *numită simetrică* (sau spațială) care a început să fie utilizată în ultimul timp, se poate simplifica prin desființarea jugurilor corespunzătoare fazei *B*, obținînd construcția mai simplă sub aspect tehnologic și mai economică, reprezentată în figura 2.32 c, axele celor trei coloane fiind în același plan. Bineînțeles, această construcție introduce o oarecare nesimetrie magnetică ; în practică, nesimetria se mai reduce prin mărirea secțiunilor jugurilor rămase cu (5—15)%. Totuși, datorită nesimetriei magnetice, curenții la funcționarea în gol din înfășurările dispuse pe coloanele laterale sînt mai mari decît curentul din înfășurarea dispusă pe coloana din mijloc căreia îi lipsesc cele două juguri și de aceea solenația necesară magnetizării ei este mai mică.

Curenții la funcționarea în gol I_{A0}, I_{B0} și I_{C0} a căror sumă fazorială este nulă în cazul conectării în stea fără fir de nul, vor forma deci un sistem trifazat nesimetric, cu defazaje diferite de 120° după cum se arată în figura 2.33. Din această cauză transformatoarele trifazate cu trei coloane se mai numesc și transformatoare *cu flux forțat*, iar cele în manta și cele spațiale, la care steaua curenților la funcționarea în gol este simetrică, *cu fluxuri libere*.

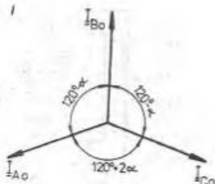


Figura 2.33. Steaua curenților la funcționarea în gol în cazul transformatoarelor trifazate cu miez feromagnetic nesimetric (cu trei coloane).

Ecuațiile de funcționare ale transformatorului monofazat, diagramele de fazori și schemele echivalente se pot utiliza și pentru studiul funcționării unui grup format din trei transformatoare monofazate.

Pentru transformatorul trifazat însă cu miez feromagnetic compact (cu sistem magnetic unic), aplicarea teoriei transformatorului monofazat la una din fazele acestuia, este posibilă numai dacă transformatorul funcționează cu sarcină simetrică, adică fiecare fază să fie încărcată identic.

Funcționarea transformatorului cu sarcină nesimetrică, formează obiectul unor studii speciale (vezi paragraful 2.4.3).

2.4.2. CONEXIUNILE ÎNFĂȘURĂRILOR TRANSFORMATOARELOR TRIFAZATE ȘI GRUPELE DE CONEXIUNI

Înfășurările fazelor care echipează transformatoarele electrice trifazate pot fi conectate între ele în diferite moduri. Precizarea modului de conectare a înfășurărilor transformatorului și a poziției relative dintre fazorii tensiunilor de linie primare și secundare (omologi), reprezintă elementele care fixează conexiunea, respectiv grupa de conexiuni a unui transformator.

A. **Marcarea (notarea) bornelor transformatoarelor.** Marcarea bornelor dată în STAS 1703-80 stabilește următoarele reguli: la înfășurările de înaltă tensiune ale transformatoarelor se prescriu literele *A*, *B* și *C* pentru începuturile lor și *X*, *Y*, *Z* pentru sfîrșiturile lor; la bornele înfășurărilor de joasă tensiune se notează cu literele *a*, *b*, *c* începuturile, și respectiv cu *x*, *y*, *z* sfîrșiturile. La transformatoarele cu trei înfășurări, pentru înfășurarea de tensiune medie se indică literele A_m, B_m, C_m și respectiv X_m, Y_m, Z_m. Punctul neutru al înfășurărilor, dacă este scos pe capac, se notează cu litera *N* respectiv *n* sau N_m. Așezarea bornelor pe capac se face în așa fel, încît privind transformatorul de sus și din partea bornelor de înaltă tensiune, dispunerea bornelor trebuie să fie în ordinea *NABC*, *nabc* sau $N_mA_mB_mC_m$.

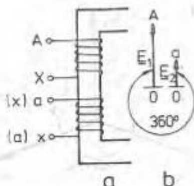


Figura 2.34. Explicativă referitoare la unghiul de defazaj între tensiunile electromotoare induse în înfășurările primară și secundară ale aceleiași faze, cînd înfășurările sînt depănate în același sens: a) înfășurările; b) fazorii t.e.m. induse.

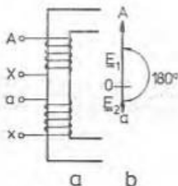


Figura 2.35. Explicativă referitoare la unghiul de defazaj între tensiunile electromotoare induse în înfășurările primară și secundară ale aceleiași faze cînd înfășurările sînt depănate în sensuri contrare: a) înfășurările; b) fazorii t.e.m. induse.

Trebuie subliniat faptul că atît pe partea de înaltă tensiune, cît și pe partea de joasă tensiune, succesiunea alfabetică a literelor coincide cu succesiunea fazelor în timp, bobinele înfășurărilor considerîndu-se că au același sens de depănare (bobinare). În acest caz, tensiunile electromotoare induse în înfășurările primară și secundară — ale aceleiași faze — sînt în fază, considerînd pentru ambele înfășurări același sens de parcurs adică de la A la X, respectiv de la a la x (fig. 2.34) și cunoscînd că cele două t.e.m. sînt induse de același flux magnetic.

Dacă înfășurările primară și secundară ar fi depănate în sensuri contrare, dar ordinea notațiilor s-ar păstra aceeași, atunci tensiunile electromotoare induse în înfășurările primară și secundară ale aceleiași faze, ar fi în opoziție (fig. 2.35). Tot în opoziție s-ar obține tensiunile electromotoare primară și secundară și dacă s-ar păstra același sens de depănare, dar s-ar schimba sensul de parcurgere al unei înfășurări, de exemplu s-ar inversa a cu x și x cu a, în figura 2.34 a.

B. **Schemele de conexiuni ale înfășurărilor.** Schemele de conectare a înfășurărilor transformatorului se indică convențional cu literă mare pentru înalta tensiune, cu literă mică, pentru joasa tensiune și cu literă mare, însoțită de indicele m, pentru înfășurările de medie tensiune ale transformatoarelor cu trei înfășurări.

La transformatoarele trifazate înfășurările de fază pot fi conectate în stea, în triunghi sau în zigzag. Cu notațiile începuturilor și sfîrșiturilor înfășurărilor de fază menționate mai sus, în figura 2.36 se prezintă schemele a două transformatoare din care să reiasă cum se pot realiza conexiunile stea, triunghi

și zigzag; alăturat fiecărei scheme de conexiuni sînt prezentate diagramele de fazori ale tensiunilor, corespunzătoare schemei respective.

a. *Schema de conexiuni stea* simbolizată cu Y (pentru înaltă tensiune) sau *y* (pentru joasă tensiune), se realizează conectînd împreună începuturile sau sfîrșiturile înfășurărilor de fază, iar capetele libere legîndu-se la bornele transformatorului (fig. 2.36). Pentru această conexiune se poate scoate la placa de borne și punctul de nul, notat cu *N* sau *n*.

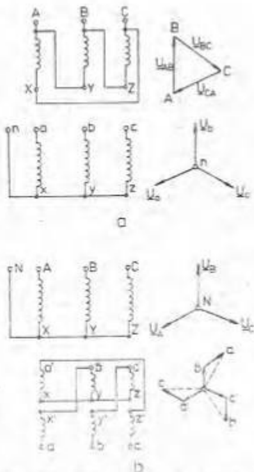


Figura 2.36. Modul de realizare a schemelor de conexiuni la două transformatoare trifazate și diagramele de fazori ale tensiunilor, corespunzătoare schemelor respective: *a* — conexiunile Dy_n; *b* — conexiunile Y_0z.

Conexiunea stea a înfășurărilor permite utilizarea unui sistem trifazat de tensiuni (tensiunile de linie) la bornele *A*, *B* și *C* sau *a*, *b* și *c* în funcție de rolul transformatorului (coborîtor sau ridicător) și a două tensiuni monofazate, și anume una numită *tensiune de fază* U_f, între punctul de nul și o bornă a transformatorului și alta numită *tensiune de linie* U_l, între două borne ale transformatorului. Din această cauză conexiunea *y* se utilizează pe scară largă la transformatoarele de distribuție; se utilizează însă și pe partea de înaltă tensiune la transformatoarele de putere.

La conexiunea stea fără fir de nul a înfășurării primare, armonica de ordinul trei și multiplu de trei a curentului de funcționare în gol nu există (v. paragraful 2.3.1), deoarece cei trei curenți de armonică trei ai celor trei faze, sînt în fază (defazajul dintre ei este $3 \cdot 120° = 360°$) și aplicînd teorema întîi a lui Kirchhoff în punctul de nul (punctul 0 din figura 2.37), se obține

$$i_{03A} + i_{03B} + i_{03C} = 0$$

adică

$$\sqrt{2} I_{03} \sin 3\omega t + \sqrt{2} I_{03} \sin 3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} I_{03} \sin 3\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = 0$$

sau (2.68)

$$\sqrt{2} I_{03} \sin 3\omega t + \sqrt{2} I_{03} \sin (3\omega t - 2\pi) + \sqrt{2} I_{03} \sin (3\omega t - 4\pi) = 0$$

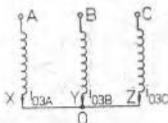


Figura 2.37. Schema de conexiune stea (Y) fără fir de nul.

relație care nu poate fi satisfăcută decît dacă

$$I_{03} = 0. \tag{2.68 a}$$

Absența curentului de armonică trei din curentul de funcționare în gol, determină apariția fluxului magnetic de armonică trei, deoarece existența armonicii a treia a curentului ar fi creat o solenație care ar fi produs un flux magnetic de armonică trei egal și de sens contrar, cu armonica a treia a fluxului magnetic util al transformatorului, ceea ce ar fi avut ca rezultat anularea armonicii a treia din curba fluxului magnetic util. Nefiind anulat, fluxul magnetic de armonică trei induce în fiecare înfășurare t.e.m. de armonică trei care apar în tensiunile de fază respective. Calculînd însă tensiunea de linie (dintre faze) se obține

$$\underline{E}_{ab} = \underline{E}_a - \underline{E}_b = \underline{E}_{a1} + \underline{E}_{a3} - (\underline{E}_{b1} + \underline{E}_{b3}), \tag{2.69}$$

unde:

E_{a1}, E_{b1} sînt t.e.m. pe fază ale armonicii fundamentale;

E_{a3}, E_{b3} — t.e.m. pe fază ale armonicii a treia.

Dar, deoarece t.e.m. de ordinul trei ale celor trei faze sînt egale în modul și în fază (defazajul dintre ele este de $3 \cdot 120° = 360°$), adică

$$\underline{E}_{a3} = \underline{E}_{b3} = \underline{E}_{c3}$$

rezultă că tensiunea de linie este

$$\underline{E}_{ab} = \underline{E}_{a1} - \underline{E}_{b1}, \tag{2.70}$$

adică în tensiunile de linie nu apar armonicile de ordinul trei.

În consecință, la conexiunea Y în primar, t.e.m. de fază din secundar va conține pe lîngă armonica fundamentală și armonica de ordinul 3, însă t.e.m. de linie, tot din secundar, va conține numai armonica fundamentală (ca și la primar, armonicile de ordinul trei se anulează reciproc, în tensiunea de linie).

Dacă înfășurarea primară este în conexiune stea cu fir de nul, (fig. 2.36 b), atunci curenții de armonică trei din curba curentului de funcționare în gol există și ca urmare se anulează fluxul magnetic de armonică trei, deci și t.e.m. de armonică trei din înfășurări.

În consecință, la conexiunea Y_N în primar t.e.m. de fază și t.e.m. de linie din secundar vor conține numai armonica fundamentală.

În cazul conexiunii stea, între valorile eficace ale mărimilor de linie și valorile eficace ale mărimilor de fază, există următoarele relații:

$$U_l = \sqrt{3}U_f;$$
$$I_l = I_f. \tag{2.71}$$

b. *Schema de conexiuni triunghi* simbolizată cu *D* sau *d*, se realizează conectînd sfîrșitul unei înfășurări de fază cu începutul altei înfășurări de fază; punctele de legătură constituie începuturile sau sfîrșiturile înfășurărilor și se scot la bornele transformatorului (fig. 2.36 a).

O caracteristică a schemei de conexiuni în triunghi este aceea că armonicile de ordinul 3 din curba curentului de fază (care sînt în fază), nu apar în curba curentului de linie, deoarece se închid în interiorul conexiunii triunghi.

Schema de conexiuni în triunghi se utilizează în special la înfăşurările de înaltă tensiune ale transformatoarelor. La conexiunea triunghi a înfăşurărilor, între valorile eficace ale mărimilor de linie şi valorile eficace ale mărimilor de fază, există următoarele relaţii:

$$U_l = U_f;$$
$$I_l = \sqrt{3} I_f. \qquad (2.72)$$

c. *Schema de conexiuni zigzag* simbolizată cu z şi utilizată numai la înfăşurările de joasă tensiune ale transformatoarelor de distribuţie, se realizează din şase semibobine egale, conectînd în serie cîte două semibobine de pe coloane diferite, apoi înfăşurările de fază astfel obţinute, se conectează în stea (fig. 2.36 b). Tensiunea de fază la schema de conexiuni zigzag, în cazul cînd cele două semibobine de pe coloane diferite au acelaşi număr de spire, are valoarea

$$U_{fz} = 2U_{fb} \cos 30^\circ = \sqrt{3} U_{fb} \qquad (2.73)$$

unde:

U_{fb} este tensiunea corespunzătoare unei semibobine.

Dacă cele şase semibobine ale înfăşurării de joasă tensiune, care formează cele trei înfăşurări de fază, s-ar înseria tot cîte două, dar de pe aceeaşi coloană s-ar realiza o schemă de conexiuni stea. În acest caz, tensiunea de fază ar fi

$$U_{fy} = 2U_{fb}$$

deci mai mare decît în cazul conexiunii z cu raportul

$$\frac{U_{fy}}{U_{fz}} = \frac{2U_{fb}}{\sqrt{3} U_{fb}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1{,}15. \qquad (2.74)$$

Deci, în cazul conexiunii z, pentru a obţine aceeaşi tensiune, ca în cazul conexiunii y trebuie puse cu aproximativ 15% mai multe spire. Între valorile eficace ale mărimilor de linie şi valorile eficace ale mărimilor de fază în cazul conexiunii z, sînt valabile aceleaşi relaţii (2.71) ca şi la conexiunea y, adică:

$$U_l = \sqrt{3} U_f;$$
$$I_l = I_f. \qquad (2.71\ a)$$

C. **Grupele de conexiuni.** Unghiul de defazaj pe care-l face fazorul tensiunii măsurate între două borne ale înfăşurării de joasă tensiune, cu fazorul tensiunii măsurate între bornele omoloage ale înfăşurării de înaltă tensiune, se indică convenţional printr-un număr. Acest număr notat cu n, nu indică altceva decît că între fazorii tensiunilor considerate, există practic acelaşi unghi de defazaj, ca şi între acele ceasornicului cînd arată una din orele fixate cuprinse între 1 şi 12, oră indicată prin numărul n.

Numărul $n = \frac{\varphi}{30^\circ}$ (unde φ este defazajul tensiunilor de linie omoloage primare şi secundare), se numeşte *număr de ordine* şi deci defazajul între aceste tensiuni omoloage din primar şi secundar, se determină înmulţind numărul n cu 30°.

Prin urmare, conexiunea unui transformator cu două înfăşurări se va simboliza prin două litere şi o cifră care, în ordine, vor indica: schema de conexiuni a înfăşurării de înaltă tensiune (litera mare), schema de conexiuni a înfăşurării de joasă tensiune (litera mică) şi defazajul dintre tensiunile de linie omoloage ale înfăşurărilor primare şi secundare, dat de numărul n. Cînd un sistem de înfăşurări — primar sau secundar — are nulul scos la borna de nul, litera care indică schema de conexiuni a sistemului considerat este afectată de indicele N, respectiv n, imediat după litera înfăşurării la care se scoate nulul.

Precizarea corectă a grupei de conexiuni prezintă importanţă practică deosebită la conectarea transformatoarelor pentru funcţionarea în paralel sau la conectarea între ele atît a elementelor unei înfăşurări a aceluiaşi transformator, cît şi de la transformatoare diferite, după cum va reieşi din cele ce urmează.

Se consideră ca exemplu, două înfăşurări reprezentate în figura 2.34, înlănţuite de acelaşi flux magnetic. Sensul t.e.m. induse în cele două înfăşurări la momentul considerat este indicat prin săgeţi.

Cu notaţiile din figura 2.34, se constată că t.e.m. induse în cele două înfăşurări $\underline{E}_1$ şi $\underline{E}_2$ sînt în fază, adică sensurile lor coincid. Dacă se schimbă între ele începuturile şi sfîrşiturile înfăşurării secundare, de exemplu ca în paranteză, atunci, deşi fenomenul fizic rămîne neschimbat faţă de situaţia anterioară, t.e.m. $\underline{E}_2$ indusă în înfăşurarea a—x, este defazată faţă de $\underline{E}_1$ cu 180° (adică în opoziţie de fază). La acelaşi rezultat se ajunge şi în cazul cînd se păstrează regula pentru fixarea începuturilor şi sfîrşiturilor celor două înfăşurări, dar se schimbă sensul de depănare (bobinare), al înfăşurării secundare aşa cum reiese din figura 2.35.

Aceste consideraţii pot fi verificate practic destul de simplu. Astfel dacă se inseriază bobinele din cele două cazuri din figurile 2.34 şi 2.35, legînd pe X cu a şi se măsoară tensiunile între capetele libere A şi x, se constată că pentru cazul din figura 2.34 se obţine suma t.e.m. induse în cele două înfăşurări, iar pentru cazul din figura 2.35, diferenţa lor. Rezultă, deci, că în cazul *transformatorului monofazat* se pot obţine două grupe de conexiuni: una cînd tensiunile sînt în fază sau defazate cu $12 \times 30° = 360°$ ca în figura 2.34 b şi alta cînd tensiunile sînt în opoziţie de fază sau defazate cu $6 \times 30° = 180°$, ca în figura 2.35 b; altfel spus, considerînd acelaşi sens de depănare (bobinare) pentru cele două înfăşurări (primară şi secundară) în figura 2.34 s-a obţinut grupa de conexiuni 12 (deoarece $n = 12$), simbolizată *Ii*-12, iar în figura 2.35, grupa 6 (deoarece $n = 6$), simbolizată *Ii*-6.

În cazul transformatoarelor trifazate, posibilităţile de realizare a unor grupe de conexiuni diferite, cresc. Conexiunile trifazate stea, triunghi şi zigzag pot forma, luate cîte două, 12 grupe diferite de conexiuni, cu defazaje între tensiunile omoloage primare şi secundare, de linie sau de fază, cuprinse între 0° şi 360°, variabile din 30° în 30° (adică n ia valori de la 1 la 12).

Ca regulă se poate stabili că în cazul conexiunilor identice în primar şi secundar, se obţin grupe de conexiuni pare (inclusiv conexiunea *Dz*), iar în cazul conexiunilor diferite în primar şi secundar, se obţin grupe de conexiuni impare (inclusiv conexiunea *Yz*). Aceasta înseamnă că pentru conexiunile *Yy*, *Dd*, şi *Dz* se pot obţine grupele de conexiuni 2, 4, 6, 8, 10 şi 12, iar pentru conexiunile *Yd*, *Dy* şi *Yz*, grupele de conexiuni 1, 3, 5, 8, 9 şi 11.

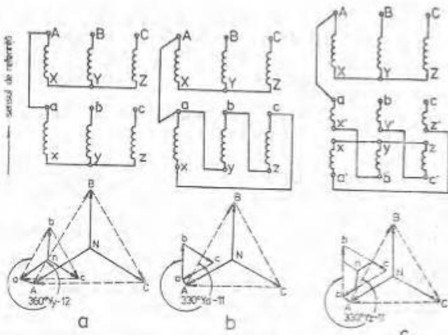


Figura 2.38. Schemele electrice și diagramele fazoriale corespunzătoare, pentru grupele de conexiuni $Yy-12$; $Yd-11$ și $Yz-11$.

Modul de formare a grupelor reiese destul de clar din figura 2.38, unde pentru a face mai sugestivă reprezentarea defazajului între tensiunile de linie omoloage din primar și secundar, bornele A și a sînt legate între ele, iar înfășurările dispuse pe aceeași coloană, sînt reprezentate una sub alta, sensul de depănare (bobinare) fiind la toate același.

Pentru stabilirea numărului n la transformatoarele trifazate, se face reprezentarea tensiunilor primare și secundare în planul complex. Pentru aceasta se consideră un sens comun (de referință) de parcurgere a înfășurărilor primare și secundare, sensul de depănare al bobinelor fiind același. Dacă sensul de parcurgere al înfășurărilor de pe același miez, de la capătul de început la cel de sfîrșit, este același la ambele înfășurări față de sensul de referință ales, tensiunile primare și secundare respective se consideră în fază ; la parcurgerea unei înfășurări în sens invers celeilalte, de pe același miez, înseamnă că tensiunea ei este în opoziție de fază față de tensiunea primei înfășurări.

Numărul n care indică grupa de conexiuni, se obține prin împărțirea unghiului de defazaj dintre tensiunile omoloage de linie, la 30° (de exemplu unghiul dintre tensiunile de linie U_{ab} și U_{AB}), așa cum se indică în figura 2.38.

Prin permutări ciclice ale bornelor și trasarea diagramelor de fazori, similar ca în figura 2.38, se pot obține pentru fiecare pereche de conexiuni, de exemplu stea și triunghi, toate cele 12 grupe.

Grupele de conexiuni mai des întîlnite în practică sînt : $Yy-6$, $Yz-5$, $Dy-11$ și $Dy-5$, iar pentru cele monofazate grupa 12 ; cu scoaterea nulului, în cazurile cînd acest lucru se impune, se poate acoperi întreaga gamă

de cerințe întîlnită în exploatare. Grupa 12 are unele avantaje în raport cu grupa 6, deoarece se conservă faza tensiunii secundare, indiferent de numărul de transformări succesive ulterioare. Grupele 11 și 5, din acest punct de vedere, sînt echivalente și adoptarea de regulă a grupei 11 la noi în țară, se explică prin tradiția fabricilor de transformatoare. Conexiunea zigzag se întîlnește mai rar, și în special la transformatoare mici, cu sarcini nesimetrice, cum ar fi cazul iluminatului electric.

2.4.3. FUNCȚIONAREA TRANSFORMATOARELOR TRIFAZATE, ÎNCĂRCATE NESIMETRIC

În condițiile de exploatare ale transformatoarelor trifazate, pot interveni situații cînd curenții și tensiunile pe cele trei faze ale transformatorului sînt diferite — cauzate de situații normale de lucru, cînd sarcina electrică este neuniform repartizată pe cele trei faze sau, situații anormale, de avarie, cînd intervin scurtcircuite nesimetrice monofazate sau bifazate.

Nesimetriile curenților și ale tensiunilor pot să aibă influențe negative atît asupra transformatorului, cît și asupra receptoarelor de energie electrică alimentate prin intermediul transformatorului considerat. Se pune, deci, problema analizei atît a fenomenelor suplimentare care apar la încărcarea nesimetrică a transformatoarelor, cît și a determinării curenților respectiv a tensiunilor, în cazul apariției unui regim nesimetric.

Analiza regimurilor trifazate de funcționare nesimetrică, se face prin descompunerea acestora în trei sisteme de funcționare simetrice și anume:

— sistemul de succesiune directă notat cu indice d;
— sistemul de succesiune inversă notată cu indice i;
— sistemul homopolar notat cu indice h.

Față de aceste sisteme transformatorul prezintă o încărcare simetrică, iar comportarea lui în acest caz, a fost studiată la paragraful 2.3.3.

În cazul transformatoarelor analiza regimurilor nesimetrice se va face în baza următoarelor ipoteze:

a) sistemul tensiunilor primare de linie este dat și formează un sistem trifazat simetric și echilibrat, independent de regimul de funcționare, deci

$$\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA} = 0; \tag{2.75}$$

b) sistemul curenților secundari de linie este dat și satisface condiția

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 3\, \underline{I}_h; \tag{2.76}$$

unde curentul homopolar I_h este nul, la sistemele de distribuție cu trei conductoare (fără fir neutru) și poate diferi de zero, la sistemele de distribuție cu patru fire (cu nul);

c) înfășurarea secundară a transformatorului este raportată la înfășurarea primară, iar factorul de transformare se consideră 1, adică $w_1 = w_2$;

d) transformatorul se consideră simetric, iar curentul de funcționare în gol se neglijează;

e) sistemul magnetic se consieră nesaturat pentru a se putea aplica principiul suprapunerii efectelor.

În aceste condiții se pune problema să se determine:

a) curenții de fază secundari I_{af}, I_{bf}, I_{cf} cînd aceștia sînt diferiți de curenții de linie I_a, I_b, I_c;

b) curenții primari pe fază I_{Af}, I_{Bf}, I_{Cf} și curenții de linie I_A, I_B, I_C;
c) tensiunile secundare de fază U_{af}, U_{bf}, U_{cf} și de linie U_a, U_b, U_c;
d) tensiunile primare de fază U_{Af}, U_{Bf}, U_{Cf}.

Analiza și calculul regimurilor nesimetrice în cazul transformatorului, se simplifică dacă se are în vedere că impedanța directă și inversă a transformatorului este identică (comportarea transformatorului rămîne neschimbată dacă la alimentarea lui se schimbă două faze între ele și deci se trece de la sistemul direct la sistemul invers al tensiunilor).

La analiza regimurilor nesimetrice trebuie avută în vedere indicația prevăzută în STAS 1893/1-86, care arată că sistemul de curenți se poate considera practic simetric, dacă raportul dintre componenta inversă a curentului I_{ai} și componenta directă I_{ad} îndeplinește condiția

$$\frac{I_{ai}}{I_{ad}}100 \leqslant 5\%. \tag{2.77}$$

Deci, analiza regimurilor nesimetrice poate avea ca obiectiv practic și verificarea relației (2.77).

A. **Încărcarea nesimetrică a transformatoarelor care au în secundar conexiunea y_n.** În cazul funcționării unui astfel de transformator cu sarcină nesimetrică, nesimetria fiind determinată de un receptor dezechilibrat în secundar, componenta de succesiune homopolară a curentului din relația (2.76) nu este nulă ($I_h \neq 0$).

Curenții secundari nesimetrici $\underline{I}_a$, $\underline{I}_b$, $\underline{I}_c$ pot fi exprimați în funcție de componentele lor de succesiune directă $\underline{I}_{ad}$, $\underline{I}_{bd}$, $\underline{I}_{cd}$, de succesiune inversă $\underline{I}_{ai}$, $\underline{I}_{bi}$, $\underline{I}_{ci}$ și de succesiune homopolară $\underline{I}_h$ sub forma:

$$\begin{aligned} \underline{I}_a &= \underline{I}_{af} = \underline{I}_{ad} + \underline{I}_{ai} + \underline{I}_h; \\ \underline{I}_b &= \underline{I}_{bf} = \underline{I}_{bd} + \underline{I}_{bi} + \underline{I}_h; \\ \underline{I}_c &= \underline{I}_{cf} = \underline{I}_{cd} + \underline{I}_{ci} + \underline{I}_h \end{aligned} \tag{2.78}$$

unde:

$$\underline{I}_{ad} + \underline{I}_{bd} + \underline{I}_{cd} = 0;$$

$$\underline{I}_{ai} + \underline{I}_{bi} + \underline{I}_{ci} = 0 \tag{2.78 a}$$

întrucît sistemele direct și invers sînt sisteme trifazate simetrice.

Dacă transformatoarele au în primar conexiunea Y_N sau D, sistemului de curenți homopolari din secundar I_h îi corespunde în primar un sistem analog de curenți, cu care să se compenseze și deci (se are în vedere ipoteza *c*, adică $w_1 = w_2$):

$$\begin{aligned} \underline{I}_{Af} &= \underline{I}_{ad} + \underline{I}_{ai} + \underline{I}_h = \underline{I}_{af}; \\ \underline{I}_{Bf} &= \underline{I}_{bd} + \underline{I}_{bi} + \underline{I}_h = \underline{I}_{bf}; \\ \underline{I}_{Cf} &= \underline{I}_{cd} + \underline{I}_{ci} + \underline{I}_h = \underline{I}_{cf}. \end{aligned} \tag{2.79}$$

Curenții de linie primari, în cazul conexiunii stea cu conductor neutru, vor fi egali cu curenții pe fază, iar în cazul conexiunii triunghi vor fi:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{Af} - \underline{I}_{Bf}; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{Bf} - \underline{I}_{Cf}; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{Cf} - \underline{I}_{Af}. \end{aligned} \tag{2.80}$$

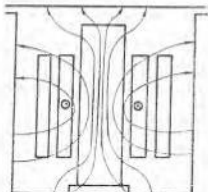


Figura 2.39. Liniile cîmpului magnetic homopolar determinat de solenaţia sistemului homopolar de curenţi din secundar.

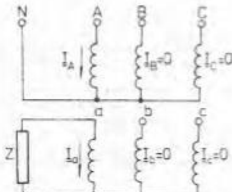


Figura 2.40. Transformator cu conexiunea $Y_N y_n$ şi încărcat cu sarcină monofazată.

Dacă primarul are conexiunea Y, fără fir de nul, curentul $I_h = 0$ şi:

$$\underline{I}_{Af} = \underline{I}_{ad} + \underline{I}_{ai} = \underline{I}_A;$$
$$\underline{I}_{Bf} = \underline{I}_{bd} + \underline{I}_{bi} = \underline{I}_B; \qquad (2.81)$$
$$\underline{I}_{Cf} = \underline{I}_{cd} + \underline{I}_{ci} = \underline{I}_C.$$

În acest ultim caz, curenţii homopolari care parcurg exclusiv înfăşurările secundare determină un cîmp magnetic homopolar ale cărui linii se închid doar parţial prin coloanele transformatorului (fig. 2.39), cîmp care induce în înfăşurările transformatorului t.e.m. homopolare.

1) *Conexiunea* $Y_N y_n$. Se consideră cazul încărcării monofazate indicată în figura 2.40, pentru care $I_a = I_{af}$ şi $I_b = I_c = 0$.

În baza relaţiei (2.79) $\underline{I}_A = \underline{I}_a$ şi $\underline{I}_B = \underline{I}_C = 0$, adică vor fi parcurse de curenţi numai înfăşurările fazelor de pe aceeaşi coloană, curenţi care se închid prin conductorul neutru, după cum se vede în figura 2.40.

Transformatorul se comportă ca un sistem de trei transformatoare monofazate, şi în ipoteza neglijării căderilor de tensiune interne ale transformatorului, nu are loc deplasarea nulului tensiunilor.

2) *Conexiunea* Dy_n. Pentru cazul încărcării monofazate ca în figura 2.41, $I_a = I_{af}$, $I_b = I_c = 0$ şi în baza relaţiilor (2.79) rezultă $I_{Af} = I_a$, $I_{Bf} = I_{Cf} = 0$, iar în baza relaţiilor (2.80)

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{Af};$$
$$\underline{I}_B = 0;$$
$$\underline{I}_C = -\underline{I}_{Af} = -\underline{I}_a.$$

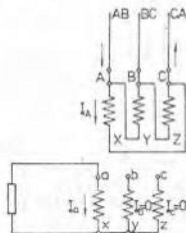


Figura 2.41. Transformator cu conexiunea Dy_n şi încărcat cu sarcină monofazată.

Primarul fiind legat în triunghi, numai înfășurarea fazei A va fi parcursă de curentul $\underline{I}_A$, curent care intră prin linia AB și iese prin linia CA.

Deci, la conexiunea Dy_n comportarea transformatorului la încărcarea unei faze a secundarului are loc independent de funcționarea celorlalte faze.

Tensiunea de fază U_{af} pentru tensiunea primară U_{Af} constantă depinde numai de regimul de funcționare a fazei respective. De aceea, avînd în vedere schemele echivalente simplificate pe fază, se poate scrie:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{Af} &= \underline{Z}_k \underline{I}_{Af} + \underline{U}_{af}; \\ \underline{U}_{Bf} &= \underline{Z}_k \underline{I}_{Bf} + \underline{U}_{af}; \\ \underline{U}_{Cf} &= \underline{Z}_k \underline{I}_{Cf} + \underline{U}_{af}. \end{aligned} \quad (2.82)$$

Trebuie remarcat că, în acest caz, fazorii tensiunilor secundare — tensiuni de fază — nu mai formează un triunghi închis întrucît

$$\underline{I}_{Af} + \underline{I}_{Bf} + \underline{I}_{Cf} = 3\underline{I}_A$$

și deci din relațiile (2.82)

$$\underline{U}_{af} + \underline{U}_{bf} + \underline{U}_{cf} = -3\underline{Z}_k \underline{I}_A \quad (2.83)$$

deoarece sistemul primar de tensiuni fiind simetric $\underline{U}_{Af} + \underline{U}_{Bf} + \underline{U}_{Cf} = 0$.

Relația (2.83) arată că nulul tensiunilor este deplasat cu tensiunea $\underline{U}_A = \underline{Z}_k \underline{I}_A$, tensiune care se poate neglija. Totodată, tensiunea $\underline{U}_{af}$ a secundarului pentru tensiunea U_{Af} a primarului constantă, depinde numai de regimul de funcționare a fazei respective. Tensiunea la bornele celorlalte două faze rămîne aproximativ constantă pentru toate variațiile de sarcină de la funcționarea în gol pînă la scurtcircuit.

3) *Conexiunea* Yy_0, pentru cazul încărcării monofazate ca în figura 2.42, $\underline{I}_a = \underline{I}_{af}$; $\underline{I}_b = \underline{I}_c = 0$.

La această conexiune, o sarcină secundară monofazată conduce la o mare nesimetrie a tensiunilor de fază atît în primar cît și în secundar.

În adevăr (fig. 2.42), prin faza secundară a trece curentul $\underline{I}_a$, iar prin fazele secundare b și c nu trece nici un curent. Corespunzător curentului $\underline{I}_a$ din faza secundară a, trece prin faza primară A curentul $\underline{I}_A$, care se închide prin fazele primare B și C.

La prima coloană solenația produsă de curentul $\underline{I}_A$ din primar este compensată de solenația produsă de curentul $\underline{I}_a$ din secundar (cele două solenații sînt aproximativ egale și de sensuri contrare). La coloanele a doua și a treia solenația curentului din primar nu poate fi compensată, deoarece în fazele secundare respective nu există nici un curent. Astfel, solenația rezul-

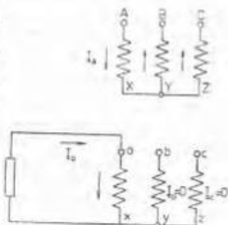


Figura 2.42. Transformator cu conexiunea Yy_0 și încărcat cu sarcină monofazată

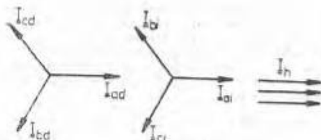


Figura 2.43. Descompunerea sistemului nesimetric de curenți în două sisteme simetrice – unul direct și altul invers și un sistem homopolar.

tantă de pe prima coloană este foarte mică, iar solenațiile de pe celelalte două coloane sînt mult mai mari. Deci, solenațiile rezultante nu formează un sistem simetric și deci nici fluxurile magnetice rezultante utile și nici tensiunile electromotoare induse.

Fenomenele sînt diferite după tipul circuitului magnetic.

În secundar pot apărea curenți homopolari, deoarece există fir de nul, iar în primar $\underline{I}_h = 0$ deoarece nu există fir de nul. Avînd în vedere că $\underline{I}_b = \underline{I}_c = 0$, din relația (2.76) rezultă $\underline{I}_h = \underline{I}_a/3$, iar în baza relației (2.78) considerînd $\underline{I}_{ad} = \underline{I}_{ai} = \underline{I}_h = \underline{I}_a/3$, rezultă o reprezentare a celor trei sisteme: direct, invers și homopolar ca în figura 2.43.

În cazul conexiunii de față, în secundar pot exista curenți homopolari, dar în primar nu este posibil acest lucru și în baza relațiilor (2.81) și a figurii 2.43 rezultă curenții din primar:

$$|\underline{I}_A| = |\underline{I}_{ad} + \underline{I}_{ai}| = |2\underline{I}_{ad}| = \frac{2}{3} I_a;$$

$$|\underline{I}_B| = |\underline{I}_{bd} + \underline{I}_{bi}| = -|\underline{I}_{ad}| = -\frac{1}{3} I_a; \qquad (2.84)$$

$$|\underline{I}_C| = |\underline{I}_{cd} + \underline{I}_{ci}| = -|\underline{I}_{ad}| = -\frac{1}{3} I_a.$$

Din cele arătate rezultă că funcționarea transformatorului trifazat cu conexiunea Yy_n și sarcină monofazată poate fi considerată ca rezultatul suprapunerii a trei regimuri: două regimuri trifazate simetrice corespunzătoare sistemelor direct și invers și un regim monofazat în secundar.

Ca urmare a curenților homopolari din secundar, apar cîmpuri magnetice homoplare pe cele trei coloane, care sînt egale ca mărime și sinfazice (deoarece curenții homopolari satisfac aceeași condiție). La transformatoarele trifazate cu trei coloane, cîmpurile magnetice homopolare nu se pot închide în totalitate prin circuitul magnetic deoarece s-ar contrazice teorema întîi a lui Kirchhoff referitoare la circuitele magnetice. De aceea aceste cîmpuri magnetice homopolare se închid prin coloane, aer, cuva transformatorului și piesele de consolidare, rezultînd în final fluxuri magnetice homopolare relativ mici.

La sistemele formate din trei transformatoare monofazate (grupul transformatoric), cîmpurile magnetice homopolare produse de curenții homopolari din

înfăşurările secundare, se închid fiecare prin miezurile magnetice ale transformatoarelor monofazate. Deoarece circuitele magnetice au permeabilitate magnetică mare, se obţin fluxuri magnetice homopolare mari chiar pentru curenţi homopolari mici. Aceste fluxuri magnetice homopolare induc în înfăşurări t.e.m. homopolare $\underline{E}_h$ care se compun cu t.e.m. de fază $\underline{E}_A$, $\underline{E}_B$ şi $\underline{E}_C$ cum se arată în figura 2.44.

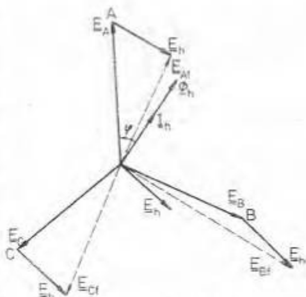


Figura 2.44. Compunerea t.e.m. de fază la transformatoarele cu conexiunea Yg_n şi sarcină monofazată.

Ca efect, se constată că t.e.m. homopolare $\underline{E}_h$ reduc tensiunea de fază a fazei încărcate $\underline{E}_{Af}$ şi măresc tensiunile de fază ale celor două faze neîncărcate $\underline{E}_{Bf}$ şi $\underline{E}_{Cf}$.

Aşa cum rezultă din figura 2.44, ar urma ca punctele A, B şi C să-şi modifice poziţiile, adică tensiunile de linie $\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{AC}$, $\underline{U}_{BC}$ să-şi modifice valorile. Ori, acest lucru nu este posibil, deoarece se consideră că transformatorul este alimentat de la o reţea de putere mare şi deci tensiunile primare nu sînt influenţate de regimul de funcţionare al transformatorului. De aceea, tensiunile homopolare au ca efect deplasarea punctului neutru al sistemului de fazori cu mărimea $\underline{E}_h$.

La transformatoarele cu trei coloane influenţa fluxului magnetic homopolar este mai redusă decît la sistemele de transformatoare cu trei transformatoare monofazate unde fluxul magnetic homopolar poate ajunge la valori de ordinul fluxurilor magnetice principale; prin urmare conexiunea Yy_n nu se întrebuinţează niciodată la grupul transformatoric trifazat.

B. Încărcarea nesimetrică a transformatorului care are în secundar conexiunile d şi z

1) *Conexiunea Yd.* Schema de conexiuni Yd cu sarcină monofazată este dată în figura 2.45. Solenaţiei produse de curentul $\underline{I}_a$ din faza ax a secundarului îi corespunde solenaţia produsă de curentul $\underline{I}_A$ din primar. Curentul I din faza AX a primarului se închide, cum s-a arătat la conexiunea Yg_n, prin fazele BY şi CZ. Secundarul fiind în triunghi, curentul sarcinii monofazate a secundarului se poate repartiza în toate fazele secundare. Din acest motiv, solenaţiile produse de curenţii din fazele secundare by şi cz compensează solenaţiile fazelor primare BY şi CZ şi, astfel, nesimetria tensiunilor secundare este mică.

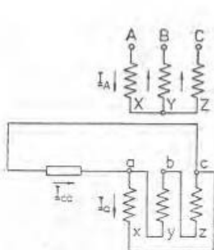


Figura 2.45. Transformator cu conexiunea Yd şi încărcat cu sarcină monofazată.

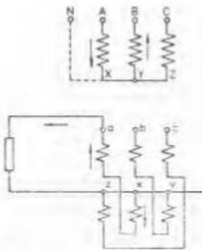


Figura 2.46. Transformator cu conexiunea Yz_n şi încărcat cu sarcină monofazată.

În cazul conexiunii Yy_n nesimetria importantă care apare are drept motiv tocmai absenţa unor curenţi în fazele by şi cz (fig. 2.42) ale secundarului, ceea ce face ca fluxurile magnetice rezultante şi tensiunile electromotoare induse, să prezinte o nesimetrie pronunţată. Rezultă că datorită prezenţei înfăşurării legate în triunghi, care permite o repartiţie mai liberă a curenţilor decît conexiunea stea, conexiunea Yd are aceleaşi avantaje în funcţionare ca şi conexiunea Dy_n.

2) *Conexiunea* Yz_n. Uneori se urmăreşte să se obţină un punct neutru la ambele înfăşurări, fără ca înfăşurarea primară să aibă conductor neutru de lucru. Pentru a îmbunătăţi repartiţia sarcinii în cazul cînd nu se prevede conductor neutru la generator, se utilizează în acest caz conexiunea stea-zigzag. În acest caz, la orice sarcină secundară monofazată, curentul secundar care trece în sens invers prin cele două bobine ale aceleiaşi faze secundare dispusă însă pe coloane diferite, este însoţit de prezenţa a doi curenţi primari egali şi opuşi în bobinele primare de pe coloanele respective (fig. 2.46).

Aceşti doi curenţi nu acţionează asupra celeilalte faze a primarului. Transformatorul cu conexiunea Yz_n se comportă ca şi transformatorul cu conexiunea Dy_n la sarcină secundară nesimetrică, fiind deci indicat pentru astfel de utilizări. Prezintă însă dezavantajul măririi greutăţii înfăşurării conectate în z.

Concluzii. Din cele expuse, rezultă că pentru a se realiza o nesimetrie cît mai mică în primar la funcţionarea în sarcină nesimetrică a transformatoarelor, este necesar ca suma solenaţiilor primară şi secundară să se compenseze pe fiecare coloană separat. Din acest punct de vedere, corespund mai bine transformatoarele cu conexiunile Y_Ny_n, Dy_n şi Yz_n indiferent de tipul circuitului magnetic (cu fluxuri magnetice libere sau fluxuri magnetice forţate) şi transfor-

matoarele cu conexiunea Yy_n cu circuitul magnetic de tipul cu fluxuri magnetice forțate (tipul obișnuit cu trei coloane). Transformatoarele de distribuție a energiei electrice cuprinzînd iluminat și instalații de putere se realizează de obicei cu conexiunea Dy_n. Aceste conexiuni, așa cum s-a arătat, au și avantajul de a evita deplasarea nulului tensiunilor în cazul sarcinilor nesimetrice.

2.5. FUNCȚIONAREA ÎN PARALEL A TRANSFORMATOARELOR DE PUTERE [8]

Două sau mai multe transformatoare se consideră că funcționează în paralel dacă au bornele primare legate la aceeași rețea de alimentare cu tensiunea U_1, iar bornele secundare sînt legate la o rețea receptoare cu tensiunea U_2.

Prezența mai multor transformatoare montate în paralel se justifică printr-o investiție realizată în timp și printr-un grad de siguranță în funcționare sporit. Asemenea situație conduce, pentru o putere totală dată, la mărirea consumului de materiale și a investițiilor precum și la creșterea pierderilor de putere. Totuși, trebuie avut în vedere faptul că receptorul alimentat de stație se dezvoltă treptat în mai mulți ani, ca putere cerută de la stație, și nu există nici o rațiune să se utilizeze de la început un transformator a cărui putere să acopere sarcina la care va ajunge receptorul în faza finală.

Totodată, fiind mai multe transformatoare cuplate în paralel, dacă se defectează unul dintre transformatoarele stației, celelalte pot suporta complet sau parțial sarcina cerută, asigurînd continuitatea alimentării cu energie electrică a receptoarelor. De asemenea, acolo unde sînt variații periodice sau sezoniere ale sarcinii, se pot decupla o parte din transformatoare de la rețea în scopul unei funcționări mai economice a întregului sistem, prin micșorarea pierderilor și al utilizării transformatoarelor în funcționare la un randament maxim.

Pentru ca mai multe transformatoare să funcționeze *normal* în paralel, trebuie satisfăcute următoarele cerințe:

a) la funcționarea în gol să nu apară curenți de circulație prin înfășurările secundare ale transformatoarelor, deoarece acești curenți provoacă pierderi importante în transformator și limitează puterea de funcționare a lui, datorită încălzirii;

b) la funcționarea în sarcină a două sau mai multe transformatoare conectate în paralel, fiecare transformator să se încarce cu o putere proporțională cu puterea lui nominală, iar curenții din secundar să fie pe cît posibil în fază.

Pentru realizarea acestor condiții, este necesar să fie analizat mai în detaliu aspectul teoretic al problemei și să fie trase concluziile cu caracter practic.

Desigur că anumite abateri de la aceste condiții sînt permise de norme și funcționarea în paralel a transformatoarelor este admisă numai în intervalul cuprins între limitele abaterilor care se vor analiza în cele ce urmează.

Cerințele pe care trebuie să le satisfacă transformatoarele pentru a putea funcționa normal în paralel, reies din studiul ecuațiilor de funcționare ale transformatorului, în care se impun aceste condiții. Astfel, plecînd de la sche-

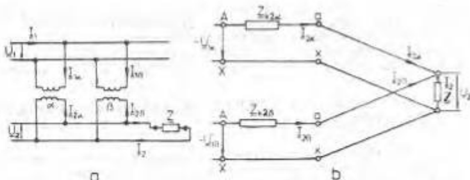


Figura 2.47. Schema electrică (a) şi schema echivalentă simplificată (b), a două transformatoare cuplate în paralel.

mele din figura 2.47, a două transformatoare monofazate indicate prin literele α şi β care debitează pe o sarcină de impedanţă Z şi avînd în vedere că mărimile sînt raportate la înfăşurarea secundară, rezultă următoarele ecuaţii:

$$\begin{aligned} -\underline{U}'_{1\alpha} &= \underline{Z}_{e2\alpha}\underline{I}_{2\alpha} + \underline{U}_2; \\ -\underline{U}'_{1\beta} &= \underline{Z}_{e2\beta}\underline{I}_{2\beta} + \underline{U}_2; \\ \underline{I}_2 &= \underline{I}_{2\alpha} + \underline{I}_{2\beta}, \end{aligned} \qquad (2.85)$$

în care:

$$U'_{1\alpha} = U_1\left(\frac{w_2}{w_1}\right)_\alpha;$$

$$U'_{1\beta} = U_1\left(\frac{w_2}{w_1}\right)_\beta;$$

$$\underline{Z}_{e2\alpha} = R'_{1\alpha} + R_{2\alpha} + j(X'_{\sigma1\alpha} + X_{\sigma2\alpha});$$

$$\underline{Z}_{e2\beta} = R'_{1\beta} + R_{2\beta} + j(X'_{\sigma1\beta} + X_{\sigma2\beta});$$

$$-\underline{I}'_{1\alpha} \approx \underline{I}_{2\alpha};$$

$$-\underline{I}'_{1\beta} \approx \underline{I}_{2\beta}.$$

Scăzînd primele două ecuaţii din relaţia (2.85) se obţine

$$-\underline{U}'_{1\alpha} + \underline{U}'_{1\beta} = \underline{Z}_{e2\alpha}\underline{I}_{2\alpha} - \underline{Z}_{e2\beta}\underline{I}_{2\beta},$$

în care, dacă se înlocuieşte $\underline{I}_{2\beta}$ din ecuaţia a treia

$$\underline{I}_{2\beta} = \underline{I}_2 - \underline{I}_{2\alpha}$$

se obţine în continuare

$$-\underline{U}'_{1\alpha} + \underline{U}'_{1\beta} = \underline{Z}_{e2\alpha}\underline{I}_{2\alpha} - \underline{Z}_{e2\beta}(\underline{I}_2 - \underline{I}_{2\alpha}).$$

Din această relaţie se determină curentul secundar $\underline{I}_{2\alpha}$

$$\underline{I}_{2\alpha} = \frac{\underline{Z}_{e2\beta}}{\underline{Z}_{e2\alpha} + \underline{Z}_{e2\beta}}\underline{I}_2 - \frac{\underline{U}'_{1\alpha} - \underline{U}'_{1\beta}}{\underline{Z}_{e2\alpha} + \underline{Z}_{e2\beta}}. \qquad (2.86)$$

Similar rezultă şi curentul secundar $\underline{I}_{2\beta}$

$$\underline{I}_{2\beta} = \frac{\underline{Z}_{t2\alpha}}{\underline{Z}_{t2\alpha}+\underline{Z}_{t2\beta}}\underline{I}_2 + \frac{\underline{U}'_{1\alpha}-\underline{U}'_{1\beta}}{\underline{Z}_{t2\alpha}+\underline{Z}_{t2\beta}}. \quad (2.86\ a)$$

Din examinarea expresiilor celor doi curenţi se observă că atît $\underline{I}_{2\alpha}$ cît şi $\underline{I}_{2\beta}$ au cîte două componente, dintre care cea de a doua componentă $\underline{I}_c$, este independentă de curentul de sarcină; ea se adună la un transformator şi se scade la celălalt. Această componentă

$$\underline{I}_c' = \frac{\underline{U}'_{1\alpha}-\underline{U}'_{1\beta}}{\underline{Z}_{t2\alpha}+\underline{Z}_{t2\beta}} \quad (2.87)$$

formează *curentul de circulaţie* dintre cele două transformatoare, încărcînd pe unul şi descărcînd pe celălalt, limitînd deci posibilităţile de încărcare la sarcină normală a ansamblului format de cele două transformatoare.

Relaţia (2.87), fiind scrisă în complex, arată că pentru anularea curenţilor de circulaţie ($\underline{I}_c = 0$) este necesar ca tensiunile primare ale transformatoarelor cuplate în paralel, să fie egale ca modul şi fază, adică

$$\underline{U}'_{1\alpha} = \underline{U}'_{1\beta}.$$

Dar, avînd în vedere că cele două transformatoare au aceeaşi tensiune primară de alimentare U_1 (fiind cuplate la aceeaşi reţea), rezultă că din egalarea modulelor celor două tensiuni raportate $U'_{1\alpha} = U'_{1\beta}$, se obţine

$$U_1\left(\frac{w_2}{w_1}\right)_\alpha = U_1\left(\frac{w_2}{w_1}\right)_\beta$$

ceea ce înseamnă că

$$\left(\frac{w_2}{w_1}\right)_\alpha = \left(\frac{w_2}{w_1}\right)_\beta. \quad (2.88)$$

Relaţia (2.88) reprezintă astfel *prima condiţie* pe care trebuie să o îndeplinească transformatoarele care se cuplează în paralel:

I. *Să aibă rapoartele de transformare egale.*

Condiţia ca tensiunile secundare să fie şi în fază conduce direct la *a doua condiţie* ca transformatoarele să poată fi cuplate în paralel:

II. *Să aibă aceeaşi grupă de conexiuni.*

Această condiţie este evidentă, întrucît la tensiunea U_1 aplicată primarului transformatoarelor, grupa de conexiuni defineşte defazajul tensiunilor secundare faţă de cele primare. Ori, cum tensiunile primare sînt în fază (fiind aceeaşi reţea) dacă transformatoarele ar avea grupe de conexiuni diferite, n-ar mai fi îndeplinită condiţia ca tensiunile secundare să fie în fază; *de la această condiţie nu există nici o abatere.*

Cele două condiţii îndeplinite rezolvă prima cerinţă, ca între transformatoare să nu existe curenţi de circulaţie.

În continuare, se vor analiza condiţiile ce trebuie să le îndeplinească transformatoarele la funcţionarea în paralel, pentru satisfacerea celei de a doua cerinţe, conform căreia fiecare transformator trebuie să se încarce cu o putere corespunzătoare proporţională cu cea nominală.

Pentru aceasta se pornește de la raportul curenților debitați de cele două transformatoare, curenți dați de relațiile (2.86) în ipoteza că $\underline{U}_{1\alpha} = \underline{U}_{1\beta}$, obținîndu-se

$$\frac{\underline{I}_{2\alpha}}{\underline{I}_{2\beta}} = \frac{\underline{Z}_{k2\beta}}{\underline{Z}_{k2\alpha}}. \tag{2.89}$$

Dacă această relație se înmulțește cu $\underline{I}_{2\beta N}$ și se împarte cu $\underline{I}_{2\alpha N}$ și are în vedere că

$$\underline{U}_{k2\alpha} = \underline{Z}_{k2\alpha}\underline{I}_{2\alpha N}$$

$$\underline{U}_{k2\beta} = \underline{Z}_{k2\beta}\underline{I}_{2\beta N}$$

se obține

$$\frac{\dfrac{\underline{I}_{2\alpha}}{\underline{I}_{2\alpha N}}}{\dfrac{\underline{I}_{2\beta}}{\underline{I}_{2\beta N}}} = \frac{\underline{U}_{k2\beta}}{\underline{U}_{k2\alpha}} = \frac{\dfrac{\underline{U}_{k2\beta}}{\underline{U}_1}100}{\dfrac{\underline{U}_{k2\alpha}}{\underline{U}_1}100} = \frac{\underline{u}_{k2\beta}}{\underline{u}_{k2\alpha}} = \frac{u_{k2\beta}}{u_{k2\alpha}} e^{j(\varphi_{k2\beta} - \varphi_{k2\alpha})}, \tag{2.90}$$

unde $\varphi_{k2\alpha}$ și $\varphi_{k2\beta}$ se definesc, după cum se știe, pe baza triunghiului de scurtcircuit (v. fig. 2.23); indicele 2 arată că primarul a fost raportat la secundar.

Relația (2.90) arată că, în practică, tensiunile de scurtcircuit pot diferi atît ca modul, cît și ca fază. Pentru simplificarea modului de analiză a influențelor pe care le au variațiile tensiunii de scurtcircuit, se vor considera două cazuri distincte și anume: cazul cînd tensiunile de scurtcircuit sînt egale ca modul, dar defazate și cazul cînd modulele lor sînt neegale, dar în fază.

În primul caz $u_{k2\alpha} = u_{k2\beta}$, dar $\varphi_{k2\alpha} \neq \varphi_{k2\beta}$, în baza relației (2.90) rezultă că valorile relative ale curenților $\underline{I}_{2\alpha}/\underline{I}_{2\alpha N}$ și $\underline{I}_{2\beta}/\underline{I}_{2\beta N}$ sînt egale în modul, dar defazate cu unghiul $\varphi_{k2\alpha} - \varphi_{k2\beta}$, cum se vede în figura 2.48.

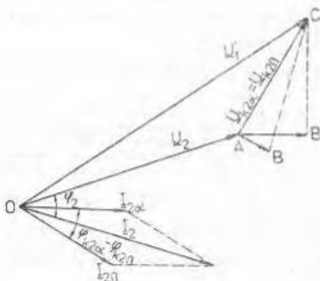


Figura 2.48. Împărțirea curenților a două transformatoare în paralel, în cazul $\varphi_{k2\alpha} \neq \varphi_{k2\beta}$.

Datorită defazajului dintre curenţi, curentul de sarcină total $\underline{I}_2$ se obţine ca sumă fazorială a celor doi curenţi, care este mai mică decît suma aritmetică şi astfel, pentru a obţine curentul $\underline{I}_2$ la receptor egal cu suma aritmetică a celor doi curenţi nominali $I_{2\alpha N}$ şi $I_{2\beta N}$ (cît s-ar obţine dacă tensiunile de scurtcircuit ar fi şi în fază), va fi necesar să se încarce cele două transformatoare la sarcini $I_{2\alpha} > I_{2\alpha N}$ şi $I_{2\beta} > I_{2\beta N}$.
Dacă $\varphi_{k2\alpha} - \varphi_{k2\beta} \leqslant 15^\circ$, suprasarcina corespunzătoare este de ordinul

$$\frac{|\underline{I}_{2\alpha}| + |\underline{I}_{2\beta}|}{|\underline{I}_{2\alpha} + \underline{I}_{2\beta}|} \leqslant \frac{1}{\cos 15^\circ} \approx 1{,}035,$$

adică nu depăşeşte cu mai mult de 3,5% sarcina normală corespunzătoare situaţiei cînd tensiunile de scurtcircuit ar fi egale şi în fază. În continuare, nu se va mai utiliza indicele 2 pentru u_k şi φ_k, concluziile fiind aceleaşi.

În cel de-al doilea caz, cînd $\varphi_{k\alpha} = \varphi_{k\beta}$, dar $u_{k\alpha} \neq u_{k\beta}$, curenţii celor două transformatoare sînt în fază şi relaţia (2.90) se mai poate scrie

$$\frac{\dfrac{I_{2\alpha}}{I_{2\alpha N}}\,\dfrac{U_{2N}}{U_{2N}}}{\dfrac{I_{2\beta}}{I_{2\beta N}}\,\dfrac{U_{2N}}{U_{2N}}} = \frac{\dfrac{S_\alpha}{S_{\alpha N}}}{\dfrac{S_\beta}{S_{\beta N}}} = \frac{u_{k\beta}}{u_{k\alpha}}$$

sau

$$\frac{S_\alpha}{S_\beta} = \frac{S_{\alpha N}}{S_{\beta N}}\,\frac{u_{k\beta}}{u_{k\alpha}} = \frac{\dfrac{S_{\alpha N}}{u_{k\alpha}}}{\dfrac{S_{\beta N}}{u_{k\beta}}} \tag{2.91}$$

sau încă

$$\frac{S_\alpha}{\dfrac{S_{\alpha N}}{u_{k\alpha}}} = \frac{S_\beta}{\dfrac{S_{\beta N}}{u_{k\beta}}} = \frac{S_\alpha + S_\beta}{\dfrac{S_{\alpha N}}{u_{k\alpha}} + \dfrac{S_{\beta N}}{u_{k\beta}}}. \tag{2.92}$$

Relaţia (2.92) arată că puterile aparente cu care cele două transformatoare contribuie la acoperirea sarcinii aparente totale $S_\alpha + S_\beta$, sînt direct proporţionale cu puterile lor nominale şi invers proporţionale cu tensiunile de scurtcircuit. Pentru ca cele două transformatoare să se încarce numai proporţional cu puterile lor nominale, din relaţiile (2.90) şi (2.91) rezultă *a treia condiţie* de cuplare în paralel:

III. *Cele două transformatoare să aibă tensiunile de scurtcircuit egale în modul şi fază, adică să aibă şi componentele active şi reactive egale:* $u_{ka\alpha} = u_{ka\beta}$ şi $u_{kr\alpha} = u_{kr\beta}$.

Relaţia (2.92) scrisă pentru cele două transformatoare poate fi extrapolată pentru ν transformatoare care funcţionează în paralel şi anume

$$\frac{S_\alpha}{\dfrac{S_{\alpha N}}{u_{k\alpha}}} = \frac{S_\beta}{\dfrac{S_{\beta N}}{u_{k\beta}}} = \ldots = \frac{S_\nu}{\dfrac{S_{\nu N}}{u_{k\nu}}} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{\nu} S_i}{\sum\limits_{i=1}^{\nu} \dfrac{S_{iN}}{u_{ki}}}. \tag{2.93}$$

Puterea debitată de un singur transformator funcție atît de puterea totală debitată cît și de puterile nominale și tensiunile de scurtcircuit ale tuturor transformatoarelor, va fi

$$S_a = \frac{S_{aN}}{u_{ka}} \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{S_{iN}}{u_{ki}}}. \qquad (2.94)$$

În *concluzie*, din cele menționate, rezultă că pentru o bună comportare a transformatoarelor, la funcționarea în paralel, sînt *necesare respectarea următoarelor condiții*:

— *transformatoarele să aibă același raport de transformare*;

— *să aibă aceeași grupă de conexiuni*;

— *să aibă tensiunile de scurtcircuit egale în modul și fază.*

Întrucît în producția curentă, din cauza toleranțelor de execuție, apar abateri de la valorile de calcul ale raportului de transformare și ale tensiunii de scurtcircuit, STAS 1703/1-80 admite abateri pentru rapoartele de transformare în limitele de $\pm 0{,}5\%$ din raportul de transformare garantat, pentru tensiunile de scurtcircuit abateri în limitele de $\pm 10\%$ din u_{1N} (v. tabelul 2.2), iar defazajul maxim dintre tensiunile de scurtcircuit să nu depășească 15°. Odată stabilite aceste abateri, reiese că pentru o funcționare normală, să nu se cupleze în paralel transformatoare ale căror puteri nominale se găsesc într-un raport mai mare de 5.

2.6. TRANSFORMATOARE SPECIALE [3, 8]

2.6.1. AUTOTRANSFORMATORUL

Autotransformatorul este un transformator a cărui înfășurare de joasă tensiune reprezintă o parte a înfășurării de înaltă tensiune, cele două părți fiind cuplate galvanic.

Autotransformatoarele pot fi monofazate sau trifazate; cele trifazate sînt conectate numai în stea. În figura 2.49 se dau schemele de principiu ale autotransformatorului monofazat.

Autotransformatoarele pot fi atît ridicătoare cît și coborîtoare de tensiune. Raportul de transformare al autotransformatorului poate fi constant sau variabil, ca în cazul autotransformatoarelor reglabile.

Reglajul tensiunii se face în trepte, tensiunea minimă a unei trepte fiind limitată de tensiunea pe spiră.

Cu notațiile și sensurile curenților din figura 2.49 b, pentru parametrii porțiunii adiționale și a înfășurării comune de joasă tensiune, se pot stabili relațiile care caracterizează autotransformatorul. Astfel, relația dintre curenți în punctul N este

$$\underline{I}_2 + \underline{I}_1 = \underline{I}_{bt} \qquad (2.95)$$

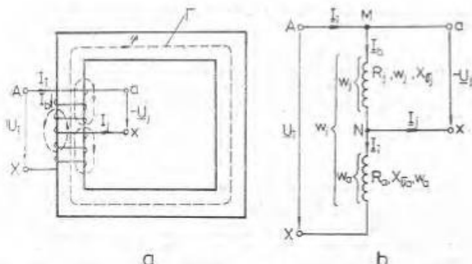


Figura 2.49. Scheme ale autotransformatorului: a — schema de principiu; b — schema electrică.

iar din aplicarea legii circuitului magnetic pe conturul unei linii de cîmp Γ, se obţine

$$\underline{I}_i w_a + \underline{I}_b w_j = \underline{I}_{i0}(w_j + w_a). \tag{2.96}$$

Dacă se neglijează curentul de funcţionare în gol faţă de curenţii nominali ($\underline{I}_{i0} \approx 0$) şi se înlocuieşte $\underline{I}_b$ în relaţia (2.96) conform relaţiei (2.95) se obţine o relaţie similară cu cea întîlnită la transformatoarele cu două înfăşurări distincte

$$\underline{I} w_i + w_j \underline{I}_j \approx 0, \tag{2.97}$$

în care:

$$w_i = w_j + w_a.$$

Curentul $\underline{I}_b$ din porţiunea comună se determină din relaţiile (2.95) şi (2.97):

$$\underline{I}_b = -\underline{I}_i(k-1) = -\underline{I}_j \frac{k-1}{k}, \tag{2.98}$$

unde:

$$k = \frac{U_i}{U_j} \approx \frac{w_i}{w_j} = \frac{w_j + w_a}{w_j} \approx \frac{I_j}{I_i} \tag{2.99}$$

este raportul de transformare al autotransformatorului.

Din relaţia (2.98) rezultă că valoarea curentului $\underline{I}_b$ din partea de înfăşurare comună depinde direct de raportul de transformare.

Pentru a compara, din toate punctele de vedere, autotransformatorul cu transformatorul cu două înfăşurări, va trebui să se cunoască expresia puterii

sale de calcul. Puterea aparentă transferată de la primar la secundar, în ipoteza neglijării pierderilor este

$$S = S_1 = U_1 I_1 \approx U_2 I_2 = S_e + S_g. \tag{2.100}$$

Această putere este transferată secundarului atît prin inducție, deci prin intermediul cîmpului electromagnetic S_e, cît și pe cale galvanică S_g. Puterea transmisă prin inducție, formează *puterea electromagnetică* sau *puterea de calcul* a autotransformatorului și este dată, avînd în vedere și relațiile (2.95) și (2.98) de expresia

$$S_e = U_1 I_{12} = U_1 I_1 \frac{k-1}{k}. \tag{2.101}$$

Din examinarea acestei relații, rezultă că puterea electromagnetică de calcul S_e a autotransformatorului este mai mică decît puterea S_1 transmisă în secundar. Explicația este simplă, deoarece la autotransformator se mai transferă putere de la primar la secundar și prin intermediul cîmpului electric, datorită legăturii galvanice dintre cele două înfășurări ($S_g = S_1 - S_e$).

Tot din relația (2.101) rezultă că autotransformatoarele sînt cu atît mai economic de construit, față de transformatoarele cu două înfășurări, cu cît raportul de transformare $k = w_1/w_2$ este mai aproape de unitate, după cum se arată de altfel și în tabelul 2.1.

TABELUL 2.1

Puterea transmisă prin inducție S_e și puterea transmisă galvanic S_g, raportate la puterea nominală S_N a autotransformatorului, în funcție de raportul de transformare k.

k	1	1,5	2	3	10
S_e/S_N S_g/S_N	0 1	1/3 2/3	1/2 1/2	2/3 1/3	9/10 1/10

La valori mari ale raportului de transformare, aceste avantaje practic dispar. Deoarece masele înfășurărilor și miezului feromagnetic sînt mai mici decît masele corespunzătoare ale transformatoarelor cu două înfășurări (autotransformatorul are dimensiuni mai mici decît transformatorul cu două înfășurări, deoarece puterea electromagnetică, adică puterea de calcul, este mai mică), rezultă că la aceleași solicitări electrice și magnetice, pierderile sînt mai mici și deci, randamentul este mai mare decît al transformatorului echivalent cu două înfășurări.

Autotransformatoarele se folosesc atît în instalațiile energetice, cît și în schemele de pornire ale motoarelor mari sincrone sau asincrone cu rotorul în scurtcircuit.

La autotransformator, impedanța de scurtcircuit este mai mică decît a unui transformator echivalent cu două înfășurări, deci și tensiunile de scurtcircuit vor fi mai mici, iar curenții de scurtcircuit vor fi proporțional mai

mari. Acest lucru impune măsuri constructive deosebite pentru asigurarea stabilității mecanice a autotransformatorului la acțiunea forțelor electrodinamice la scurtcircuit.

Autotransformatoarele prezintă dezavantajul legării galvanice a primarului cu secundarul. Astfel, supratensiunile care apar pe o linie electrică se transmit către linia cealaltă. De aceea, autotransformatoarele sînt utilizate fie numai în rețelele de înaltă tensiune, fie în cele de joasă tensiune. La aceasta se mai adaugă și faptul că circuitul de joasă tensiune trebuie să aibă aceeași izolație față de masă (miez) cu și circuitul de înaltă tensiune.

2.6.2. TRANSFORMATORUL CU TREI ÎNFĂȘURĂRI

Transformatoarele de mare putere, care se instalează la începutul sau la sfîrșitul liniilor de transport a energiei electrice, precum și în instalațiile intermediare de transformare, se construiesc adesea cu trei înfășurări, una din ele fiind înfășurarea primară, iar celelalte două, înfășurări secundare. De exemplu, în centralele electrice de unde pleacă două linii de transport se instalează un transformator cu trei înfășurări a cărui tensiune primară poate fi de 10,5 kV (cea a generatorului), iar cele secundare (ale liniilor de transport) de 121 kV și 38,5 kV, ceea ce înseamnă că acest transformator înlocuiește de fapt două transformatoare cu două înfășurări, avînd performanțe tehnico-economice superioare față de acestea. Schema de principiu a transformatorului cu trei înfășurări este dată în figura 2.50.

Dacă se aplică legea circuitului magnetic pe un contur închis Γ, format de o linie medie a cîmpului magnetic util, se poate scrie următoarea relație între solenațiile celor trei înfășurări

$$w_1\underline{I}_1 + w_2\underline{I}_2 + w_3\underline{I}_3 = w_1\underline{I}_{10}. \tag{2.102}$$

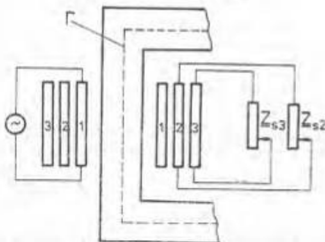


Figura 2.60. Schema de principiu a transformatorului cu trei înfășurări (o fază).

Dacă sensul curenților în cele trei înfășurări de fază se adoptă astfel încît circuitul primar se consideră receptor și celelalte două — generatoare, atunci, pentru regimul permanent de funcționare, pot fi scrise direct în complex relațiile corespunzătoare unei faze (v. și rel. (2.19) și (2.20)) :

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= R_1\underline{I}_1 + jX_{11}\underline{I}_1 + jX_{12}\underline{I}_2 + jX_{13}\underline{I}_3; \\ -\underline{U}_2 &= R_2\underline{I}_2 + jX_{22}\underline{I}_2 + jX_{23}\underline{I}_3 + jX_{21}\underline{I}_1; \\ -\underline{U}_3 &= R_3\underline{I}_3 + jX_{33}\underline{I}_3 + jX_{31}\underline{I}_1 + jX_{32}\underline{I}_2. \end{aligned} \qquad (2.103)$$

Reactanțele de forma X_{ii}, sînt reactanțele totale ale înfășurărilor i, iar reactanțele de forma X_{ij}, sînt cele corespunzătoare inductanțelor mutuale dintre înfășurările cu numerele de ordine i și j, unde $i, j = 1, 2, 3$.

Raportînd înfășurarea secundară și cea terțiară la înfășurarea primară, sistemul (2.103), completat și cu relația (2.102) devine :

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= R_1\underline{I}_1 + jX_{11}\underline{I}_1 + jX'_{12}\underline{I}'_2 + jX'_{13}\underline{I}'_3; \\ -\underline{U}'_2 &= R'_2\underline{I}'_2 + jX'_{22}\underline{I}'_2 + jX'_{23}\underline{I}'_3 + jX'_{21}\underline{I}_1; \\ -\underline{U}'_3 &= R'_3\underline{I}'_3 + jX'_{33}\underline{I}'_3 + jX'_{31}\underline{I}_1 + jX'_{32}\underline{I}'_2; \\ &\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 + \underline{I}'_3 = \underline{I}_{10} \end{aligned} \qquad (2.104)$$

unde s-au notat :

$$\underline{I}'_2 = \frac{w_2}{w_1}\underline{I}_2 = \frac{\underline{I}_2}{k_{12}}; \qquad \underline{I}'_3 = \frac{w_3}{w_1}\underline{I}_3 = \frac{\underline{I}_3}{k_{13}};$$

$$\underline{U}'_2 = \frac{w_1}{w_2}\underline{U}_2 = k_{12}\underline{U}_2; \qquad \underline{U}'_3 = \frac{w_1}{w_3}\underline{U}_3 = k_{13}\underline{U}_3;$$

$$R'_i = \left(\frac{w_1}{w_i}\right)^2 R_i = k_{1i}^2 R_i; \qquad X'_{ii} = \left(\frac{w_1}{w_i}\right)^2 X_{ii} = k_{1i}^2 X_{ii};$$

$$X'_{1i} = X'_{i1} = \frac{w_1}{w_i} X_{1i} = k_{1i} X_{1i}$$

$$X'_{23} = X'_{32} = \frac{w_1}{w_2}\frac{w_1}{w_3} X_{23} = k_{12}k_{13}X_{23},$$

iar

$$i = 2;\ 3.$$

Scăzînd din prima ecuație a sistemului (2.104) pe a doua, apoi pe a treia și înlocuind din ecuația a patra curenții corespunzători, în ipoteza $\underline{I}_{10} = 0$, se obține :

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 + \underline{U}'_2 = \underline{I}_1[R_1 + j(X_{11} - X'_{12} - X'_{31} + X'_{32})] - \underline{I}'_2[R'_2 + j(X'_{22} - \\ - X'_{21} + X'_{31} - X'_{32})]; \\ \underline{U}_1 + \underline{U}'_3 = \underline{I}_1[R_1 + j(X_{11} - X'_{31} - X'_{12} + X'_{23})] - \underline{I}'_3[R'_3 + j(X'_{33} - \\ - X'_{23} + X'_{21} - X'_{31})]. \end{aligned} \qquad (2.105)$$

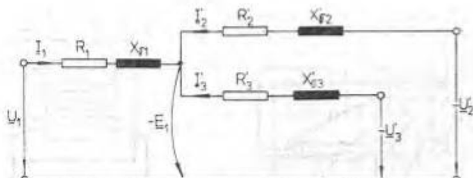


Figura 2.51. Schema echivalentă simplificată ($\underline{I}_0 = 0$) a transformatorului cu trei înfășurări

Notînd:

$$
\begin{aligned}
X_{\sigma 1} &= X_{11} - X'_{12} - X'_{31} + X'_{32} \\
X'_{\sigma 2} &= X'_{22} - X'_{21} + X'_{31} - X'_{32} \qquad (2.106) \\
X'_{\sigma 3} &= X'_{33} - X'_{32} + X'_{21} - X'_{31},
\end{aligned}
$$

relațiile (2.105) completate cu ultima din relațiile (2.104) în care $\underline{I}_{10} = 0$, devin:

$$
\begin{aligned}
&\underline{U}_1 + \underline{U}'_2 = R_1\underline{I}_1 + jX_{\sigma 1}\underline{I}_1 - R'_2\underline{I}'_2 - jX'_{\sigma 2}\underline{I}'_2 = \underline{Z}_1\underline{I}_1 - \underline{Z}'_2\underline{I}'_2; \\
&\underline{U}_1 + \underline{U}'_3 = R_1\underline{I}_1 + jX_{\sigma 1}\underline{I}_1 - R'_3\underline{I}'_3 - jX'_{\sigma 3}\underline{I}'_3 = \underline{Z}_1\underline{I}_1 - \underline{Z}'_3\underline{I}'_3; \qquad (2.107) \\
&\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 + \underline{I}'_3 = 0.
\end{aligned}
$$

Schema electrică simplificată, corespunzătoare sistemului de ecuații dat de relațiile (2.107) este reprezentată în figura 2.51.

La transformatorul cu trei înfășurări cînd variază sarcina la una din înfășurările considerate ca generatoare, variază tensiunea la ambele înfășurări generatoare, deoarece apare căderea de tensiune $\underline{Z}_1\underline{I}_1$, cum se poate vedea în figura 2.51.

Ca putere nominală a transformatoarelor cu trei înfășurări, se consideră puterea acelei înfășurări, care asigură transferul celei mai mari puteri. Puterea diverselor înfășurări se stabilește în funcție de condițiile concrete de exploatare.

Pentru funcționarea în paralel a transformatoarelor trifazate cu trei înfășurări trebuie satisfăcute aceleași condiții ca și în cazul transformatoarelor cu două înfășurări.

Grupa de conexiuni utilizată la transformatoarele cu trei înfășurări este $Y_N yd$-12-11.

2.6.3. TRANSFORMATORUL PENTRU SUDARE CU ARC ELECTRIC

Acest transformator are în secundar o tensiune de funcționare în gol necesară aprinderii arcului de 65—80 V, iar în timpul operației de sudare trebuie să scadă la 20—25 V.

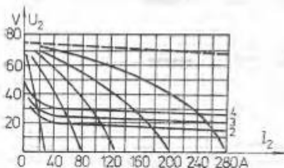


Figura 2.52. Caracteristicile externe ale unui transformator pentru sudare cu arc.

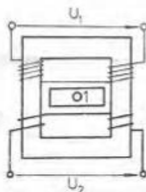


Figura 2.53. Transformator pentru sudare cu arc, cu reglaj prin șuntul magnetic 1, deplasabil.

Realizarea unei suduri bune impune ca operația de sudare să se facă la curent constant, chiar dacă variază lungimea arcului care formează impedanța circuitului secundar. Satisfacerea acestor condiții se obține printr-o caracteristică externă foarte înclinată (fig. 2.52). Forma acestor caracteristici coborîtoare se obține dacă transformatorul are o reactanță de scăpări mare sau dacă se mărește artificial această reactanță.

Transformatoarele cu reactanță proprie de scăpări mărită prin construcție, au înfășurările primare și secundare așezate pe coloane diferite sau în cazul așezării înfășurărilor în mod obișnuit se prevăd șunturi magnetice cu miezul din tole care să conducă la creșterea cîmpului magnetic de scăpări. Șunturile sînt fixe sau deplasabile. În figura 2.53 este reprezentat un transformator de sudură cu șunt deplasabil. Reluctanța circuitului magnetic principal al transformatorului poate fi variată în vederea menținerii constante a curentului de sudare, prin deplasarea șuntului perpendicular pe planul figurii, astfel încît fluxul magnetic de scăpări să varieze după necesitatea operației de sudare. Se obține cîte o caracteristică externă $U_2 = f(I_2)$ pentru fiecare poziție a șuntului. Curentul de sudare este cu atît mai mic, cu cît fluxul magnetic derivat de șunt este mai mare, obținîndu-se astfel un reglaj continuu.

Transformatorul cu șunt fiind economic, este utilizat pe scară largă. Prezintă dezavantajul de a fi zgomotos, prin vibrațiile puternice la care este supus șuntul magnetic.

Caracteristicile externe căzătoare pentru sudarea cu arc, se mai obțin cu ajutorul unor transformatoare de construcție normală care sînt legate în serie cu bobine de reactanță reglabile, pentru mărirea impedanțelor totale ale circuitelor secundare.

În figura 2.54 este reprezentat schematic un tip de transformator pentru sudare cu bobină de reactanță auxiliară.

Reglajul curentului de sudare se obține prin variația întrefierului δ, din circuitul magnetic al bobinei B. Ca și în cazul precedent, reglajul se face

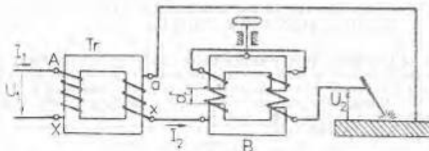


Figura 2.54. Transformator pentru sudare cu bobină de reactanță separată.

în mod continuu. Dispozitivul s-a dovedit a fi comod și economic, în special în cazul instalațiilor de sudare cu mai multe posturi alimentate simultan de la același transformator, de regulă trifazat. Fiecare post dispunînd de bobină proprie de reactanță, reglajul curentului local de sudură este asigurat fără ca celelalte posturi să fie influențate.

2.6.4. TRANSFORMATOARE PENTRU CUPTOARE ELECTRICE

Aceste transformatoare se caracterizează prin tensiuni relativ joase și prin curenți foarte mari în înfășurarea secundară. La transformatoarele de mare putere, curenții secundari ajung pînă la 100 kA, iar tensiunile de scurtcircuit pot depăși 20%.

Tensiunile, respectiv curenții secundari, sînt reglați în limite largi cu ajutorul a 4—6 prize scoase la înfășurarea primară.

Serviciul de funcționare al acestor transformatoare se caracterizează prin variații bruște de curent, pînă la scurtcircuit. Din această cauză aceste transformatoare au o construcție robustă a înfășurărilor, pentru a rezista la acțiunea frecventă a forțelor electrodinamice.

2.7. FENOMENE TRANZITORII ÎN TRANSFORMATOARE [3, 5]

Dacă o mărime de care depinde funcționarea transformatorului (tensiunea, impedanța de sarcină, frecvența etc.) variază, are loc trecerea de la un regim stabil de funcționare la altul. Trecerea se produce într-un timp foarte scurt și poate fi însoțită de efecte periculoase pentru transformator. Astfel de efecte sînt: apariția unor eforturi mecanice mari între diferitele părți ale înfășurărilor, producerea unor intensități mari ale cîmpului electric etc. După cum mărimea care determină în principal regimul tranzitoriu este curentul, respectiv tensiunea, fenomenele tranzitorii se pot clasifica în: fenomene de supracurenți și fenomene de supratensiune.

Supracurenții pot apărea atît la conectarea transformatorului la rețea, cît și în caz de scurtcircuite. Supratensiunile pot apărea la conectarea transformatorului la rețea, la variații ale impedanței de sarcină în mod brusc, sau sub acțiunea descărcărilor atmosferice.

2.7.1. CURENTUL DE CONECTARE LA REȚEA LA FUNCȚIONAREA ÎN GOL A TRANSFORMATORULUI

Se va presupune inițial permeabilitatea magnetică a materialului feromagnetic al miezului ca fiind constantă. De asemenea, se va admite că transformatorul avînd circuitul secundar deschis (în gol) se conectează la o rețea de putere foarte mare comparativ cu aceea a transformatorului. Ecuația tensiunilor se poate scrie în acest caz

$$u_1 = R_1 i_0 + L_1 \frac{di_0}{dt}, \qquad (2.108)$$

unde s-a notat:

u_1 — tensiunea la bornele unei faze a înfășurării primare, în valoare instantanee;

i_0 — curentul pe aceeași fază, în valoare instantanee;

R_1 — rezistența unei faze a primarului;

L_1 — inductanța totală a unei faze a primarului.

Se va presupune că tensiunea u_1, variază sinusoidal. Momentul la care se efectuează conectarea este determinat de unghiul de fază al tensiunii α_0. Momentul în care are loc conectarea se va considera origine a timpului. Ținînd seama de forma de variație a lui u_1, ecuația (2.108) se poate scrie

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = R_1 i_0 + L_1 \frac{di_0}{dt}. \qquad (2.109)$$

Soluția ecuației diferențiale (2.109) este

$$i_0 = i_{0p} + i_{0l} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi_0) +$$

$$+ \frac{U_{1m}}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} \sin(\varphi_0 - \alpha_0) e^{-\frac{R_1}{L_1} t}. \qquad (2.110)$$

În relația (2.109) mărimea i_0 reprezintă valoarea instantanee a curentului la conectare, transformatorul funcționînd în gol. Componenta i_{0p} este *componenta permanentă a curentului* de funcționare în gol, iar i_{0l} este *componenta liberă* a curentului de funcționare în gol. De obicei $\varphi_0 \approx 90°$. Cu această simplificare, relația (2.110) devine

$$i_0 = i_{0p} + i_{0l} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} \cos(\omega t + \alpha_0) +$$

$$+ \frac{U_{1m}}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} \cos \alpha_0 e^{-\frac{R_1}{L_1} t}. \qquad (2.111)$$

Din expresia stabilită pentru curentul i_0 rezultă:

a) în momentul cuplării, cele două componente i_{0p} și i_{0l} sînt egale în valoarea absolută, dar au sensuri contrare, deci i_0 este nul în momentul inițial;

b) din expresia (2.111) se deduce că i_{0l} are valoarea maximă dacă conectarea la rețea se face în momentul cînd tensiunea trece prin zero, adică $\alpha_0 = 0$;

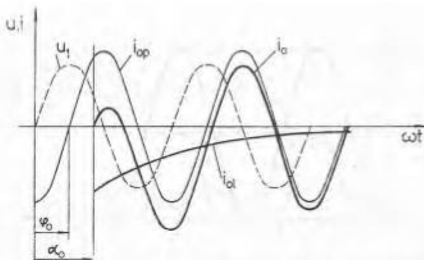


Figura 2.55. Variația în timp a curentului transformatorului la conectarea acestuia funcționînd în gol.

c) dacă conectarea se face cînd tensiunea trece prin valoarea maximă, adică $\alpha_0 = 90°$, atunci i_{0l} este nul;

d) componenta liberă a curentului, i_{0l} se amortizează cu o viteză care depinde de constanta de timp $T = \frac{L_1}{R_1}$.

În figura 2.55 este reprezentată curba curentului i_0 și a componentelor sale i_{0p} și i_{0l}.

Variația fluxurilor magnetice din miezul transformatorului se produce în același mod ca variația curenților, deoarece s-a neglijat fenomenul de saturație și de asemenea magnetismul remanent. Astfel, curenților i_{0p} și i_{0l} corespund fluxurile magnetice φ_{0p} și φ_{0l}. Dacă fluxul magnetismului remanent din miez este în valoare absolută Φ_{rem}, atunci pentru $\alpha_0 = 0$ și $R_1 = 0$, valoarea maximă a fluxului magnetic rezultant în miez este

$$\Phi_{0\,max} = 2\Phi_{0m} \pm \Phi_{rem}, \tag{2.112}$$

unde Φ_{0m} reprezintă amplitudinea componentei periodice a fluxului magnetic în miez.

Dacă $R_1 = 0$ atunci constanta de timp este infinită și regimul tranzitoriu nu ar putea deveni stabil. Dacă simultan $\alpha_0 = 0$ și $R_1 = 0$, atunci curentul i_0 oscilează între zero și valoarea dublă a amplitudinii componentei permanente i_{0p} un timp infinit (fig. 2.56), adică se stabilește direct regimul staționar corespunzător acestui caz.

Se va presupune, în continuare, că permeabilitatea magnetică a miezului feromagnetic depinde de saturație. Atunci inductanța totală L_1 variază mult în timpul unei perioade. În acest caz, ecuația tensiunilor trebuie scrisă sub forma

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = R_1 i_0 + \frac{d\psi_0}{dt} = R_1 i_0 + w_1 \frac{d\Phi_0}{dt}, \tag{2.113}$$

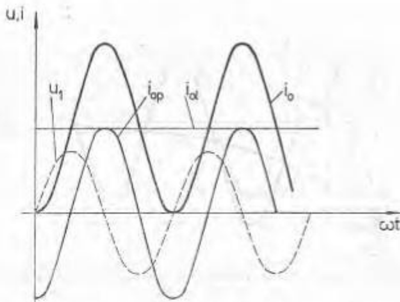


Figura 2.56. Variația în timp a curentului la conectarea transformatorului funcționînd în gol pentru $R_1 = 0$ și $\alpha_0 = 0$.

unde ψ_0 este fluxul magnetic înlănțuit, iar Φ_0 este fluxul magnetic fascicular, ambele în valoare instantanee.

Se va examina numai regimul limită cînd $R_1 = 0$. Ecuația precedentă ia în acest caz forma simplă

$$U_{1m} \sin (\omega t + \alpha_0) = w_1 \frac{d\Phi_0}{dt}. \tag{2.113 a}$$

Soluția ecuației diferențiale (2.113 a) este

$$\Phi_0 = -\frac{U_{1m}}{w_1\omega} \cos (\omega t + \alpha_0) + C = -\Phi_{0m} \cos (\omega t + \alpha_0) + C. \tag{2.114}$$

Din condiția inițială $\Phi_0 = \pm \Phi_{rem}$, la $t = 0$, se determină constanta C, obținîndu-se

$$C = \Phi_{0m} \cos \alpha_0 \pm \Phi_{rem}.$$

Introducînd pe C în relația (2.114) rezultă

$$\Phi_0 = -\Phi_{0m} \cos (\omega t + \alpha_0) + \Phi_{0m} \cos \alpha_0 \pm \Phi_{rem}. \tag{2.114 a}$$

Expresia (2.114 a) conține în membrul al doilea trei termeni: primul este componenta în regim permanent, al doilea este componenta corespunzătoare regimului liber, iar al treilea corespunde magnetismului remanent.

Situația cea mai nefavorabilă de cuplare la rețea este atunci cînd tensiunea trece prin zero. Dacă fluxul magnetic remanent are același sens ca fluxul magnetic al regimului liber, iar $\alpha_0 = 0$, amplitudinea fluxului magnetic

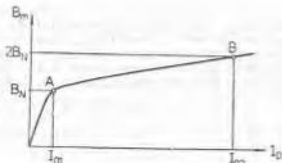


Figura 2.57. Caracteristica de magnetizare a circuitului magnetic al transformatorului și saltul de curent datorită saturației miezului.

rezultant este $2\Phi_{0m} + \Phi_{rem}$. Se obține astfel aceeași concluzie ca în cazul cînd s-a presupus permeabilitatea magnetică constantă. Aspectul fenomenului este deci același în ceea ce privește fluxurile magnetice, indiferent că permeabilitatea este sau nu constantă. Fenomenul este însă diferit în ceea ce privește curentul. În adevăr, datorită saturației, intensitatea curentului crește într-o măsură mult mai mare decît fluxul magnetic. Pentru a se pune în evidență ordinul de mărime al creșterii curentului de cuplare, în figura 2.57 s-a reprezentat punctul A, care corespunde valorii nominale a inducției magnetice. După cum se vede în figura 2.57, în acest caz, amplitudinea curentului de cuplare I_{02} poate să depășească de mai multe ori amplitudinea curentului de funcționare în gol în regim permanent I_{01}. Încercările experimentale au arătat că pentru inducția $B_m = 1{,}4$ T (corespunzătoare regimului de funcționare permanent, în gol) raportul dintre amplitudinea curentului de cuplare și amplitudinea curentului permanent de funcționare în gol este 50—80, iar pentru inducții mai mari acest raport este 100—120. Ținînd seama însă că valoarea curentului de funcționare în gol reprezintă aproximativ 5% din valoarea curentului nominal, urmează că amplitudinea curentului de cuplare poate fi de 6—8 ori superioară amplitudinii curentului nominal.

Din încercările experimentale se constată că amortizarea curentului de cuplare datorită rezistenței ohmice R_1 se realizează, practic, în aproximativ 6—8 secunde, iar la transformatoarele mari cu tensiuni înalte, în aproximativ 20 secunde sau chiar mai mult.

Curentul care apare la cuplarea transformatorului funcționînd în gol, nu reprezintă un pericol pentru transformator. Valoarea mare a curentului poate însă duce la decuplarea transformatorului de la rețea de către sistemul de protecție maximală de curent.

2.7.2. SCURTCIRCUITUL BRUSC LA BORNELE SECUNDARULUI TRANSFORMATORULUI

Scurtcircuitul trifazat brusc constituie un proces de avarie a transformatorului.

La studiul fenomenelor de scurtcircuit, după cum s-a arătat anterior pentru scurtcircuitul de probă, deci la tensiune redusă (v. paragraful 2.3.2),

curentul de magnetizare se poate neglija. Chiar dacă tensiunea aplicată este mai mare, căderea de tensiune pe reactanța de scăpări a înfășurării primare este relativ mare și, deci, fluxul magnetic în miez este relativ mic, ceea ce înseamnă că neglijarea menționată a curentului de magnetizare rămîne valabilă. Cu această simplificare schema echivalentă a transformatorului este un circuit care are parametrii (v. și relația (2.48 a))

$$R_k = R_1 + R_2'; \quad L_k = L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}'.$$

Presupunînd tensiunea la bornele primarului sinusoidală, ecuația tensiunilor este

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_k) = R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt}. \tag{2.115}$$

Soluția ecuației diferențiale (2.115) este similară cu cea dată în relația (2.110) și anume

$$i_k = i_{kp} + i_{kl} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{R_k^2 + (\omega L_k)^2}} \sin(\omega t + \alpha_k - \varphi_k) +$$

$$+ \frac{U_{1m}}{\sqrt{R_k^2 + (\omega L_k)^2}} \sin(\varphi_k - \alpha_k) e^{-\frac{R_k}{L_k} t}, \tag{2.116}$$

unde i_k reprezintă valoarea instantanee a curentului de scurtcircuit brusc, cu componenta permanentă i_{kp} și liberă (aperiodică) i_{kl}.

Dacă se consideră că rezistența R_k este mult mai mică decît reactanța X_k, se poate scrie cu o bună aproximație

$$\varphi_k = \operatorname{arc\,tg}\left(\frac{X_k}{R_k}\right) \approx 90°$$

și relația (2.116) devine

$$i_k = i_{kp} + i_{kl} = -\frac{U_{1m}}{\sqrt{R_k^2 + (\omega L_k)^2}} \cos(\omega t + \alpha_k) +$$

$$+ \frac{U_{1m}}{\sqrt{R_k^2 + (\omega L_k)^2}} (\cos \alpha_k) e^{-\frac{R_k}{L_k} t}. \tag{2.117}$$

În fenomenele de scurtcircuit, rolul principal îl au inductanțele de scăpări. Pentru situația ideală în care $R_k = 0$, amplitudinea lui i_k poate atinge o valoare de două ori mai mare decît amplitudinea curentului de scurtcircuit I_k în regim permanent. Se poate scrie în acest caz raportul

$$k_k = \frac{i_{km}}{I_{kp}} = 2.$$

Curentul de scurtcircuit ajunge repede la valoarea de regim permanent. Amortizarea componentei libere este deosebit de rapidă la transformatoarele de putere mică, la care rezistența R_k este apropiată ca ordin de mărime cu

reactanța X_k (raportul $\frac{R_k}{X_k}$ este în acest caz de ordinul 0,3—0,5). Amortizarea se realizează în aceste cazuri practic într-o singură perioadă și raportul k_s definit mai sus este

$$k_s = 1,2—1,3.$$

Valorile mari ale curenților de scurtcircuit brusc (10—30 ori curentul nominal)' sînt destul de periculoase pentru transformator prin acțiunea forțelor electrodinamice, cum se prezintă în paragraful 3.7.1.

2.7.3. SUPRATENSIUNI ÎN TRANSFORMATOARE

A. **Schema echivalentă a transformatorului la supratensiuni și repartiția tensiunii în lungul înfășurării.** În exploatarea transformatorului pot să intervină supratensiuni care pot pune în pericol izolația sa.

Aceste supratensiuni pot interveni în urma unor manevre normale de lucru în sistem — conectări, deconectări de receptoare — sau în urma unor avarii — scurtcircuite, puneri la pămînt, și în acest caz, sînt așa numitele *supratensiuni interne* sau de *comutație*.

În afara supratensiunilor interne pot apărea și *supratensiuni de origine atmosferică* numite și *supratensiuni externe*, transmise transformatorului din rețeaua electrică supusă descărcărilor atmosferice, sub formă de unde de supratensiuni.

Supratensiunile se propagă de-a lungul liniilor electrice sub formă de unde electromagnetice numite *unde de șoc* sau de *impuls* (fig. 2.58), cu o viteză aproape egală cu cea a luminii. Ajungînd la bornele transformatorului, aceste unde în parte se reflectă, întorcîndu-se pe linie, iar în parte pătrund în transformator, unde se repartizează de-a lungul înfășurării.

Datele din exploatare au arătat că supratensiunile provocate de procesele de conectare și de deconectare depășesc tensiunea nominală de fază a liniei de 2—4 ori, cele datorite deranjamentelor de 7—8 ori și cele datorite descărcărilor atmosferice de 8—12 ori.

Creșterea tensiunii undelor aperiodice (fig. 2.58) la supratensiunile atmosferice, de la valoarea zero la valoarea lor maximă se face într-un timp de ordinul microsecundelor; ramura ascendentă a curbei din figura 2.58 se numește *frontul undei* și poate fi considerat ca jumătate din alternanța unui proces periodic a cărui frecvență este de ordinul sutelor de kHz. Frecvențele supratensiunilor interne sînt mai mici, de ordinul zecilor de kHz.

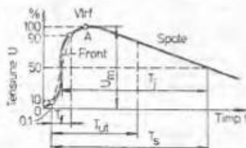


Figura 2.58. Unda de impuls (aperiodică) în cazul supratensiunilor de natură atmosferică.

Supratensiunile a căror valoare este mai mică decît 2,5 ori tensiunea nominală se consideră inofensive.

Cele mai periculoase supratensiuni, atît prin amplitudinea undei

de șoc, cît și prin frecvența lor, sînt cele provenite din descărcările atmosferice, în primul rînd din descărcările survenite direct în linie, în apropierea transformatorului.

Fenomenul repartizării undei de șoc de-a lungul înfășurării transformatorului este foarte complicat și nu poate fi redat, pe de-a întregul, în relații matematice. De regulă, se recurge la o serie de ipoteze care permit examinarea esenței fenomenului și tragerea unor concluzii de ordin practic.

Supratensiunile dau naștere în transformator unor procese oscilatorii de frecvență înaltă și foarte înaltă.

În aceste condiții, reactanța inductivă ($X_L = \omega L$) a transformatorului devine foarte mare, în timp ce reactanțele capacitive ($X_C = 1/\omega C$) se micșorează considerabil. Din această cauză în schemele echivalente ale transformatoarelor supuse la supratensiuni, se consideră de regulă capacitățile înfășurărilor: dintre spire, dintre înfășurări și dintre înfășurări și masă.

Astfel, în figura 2.59 a s-a reprezentat schema echivalentă simplificată a transformatorului în caz de supratensiune, unde s-a luat o singură înfășurare și s-au notat cu L_w *inductanțele elementelor de înfășurare* (a spirelor), cu C'_w *capacitățile dintre două spire consecutive* și cu C'_p *capacitățile spirelor față de masă*.

Cum s-a menționat la supratensiuni $X_L \gg X_C$, ceea ce înseamnă că în cazul undei de șoc curentul acesteia va trece prin capacități, rezultînd schema echivalentă redusă, din figura 2.59 b.

Cele w elemente (spire) ale înfășurării fiind legate în serie, se pot determina pentru schema reprezentată valorile globale ale inductanțelor și capacităților

$$L_e = wL_w; \quad C_0 = \frac{1}{w} C'_w; \quad C_p = wC'_p. \tag{2.118}$$

Capacitatea C_0 reprezintă capacitatea primei spire față de ultima spiră și se numește *capacitate longitudinală*, iar C_p reprezintă capacitatea înfășu-

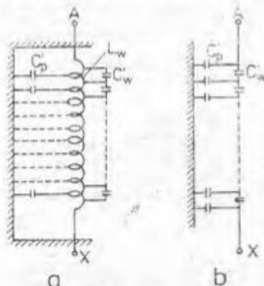


Figura 2.59. Schema echivalentă simplificată a unei înfășurări (a) și cea redusă la capacități (b), în cazul transformatorului supus la unda de șoc.

rării față de pămînt și se numește *capacitate transversală* a înfășurării. Aceste capacități pot fi reunite într-o capacitate echivalentă dată de relația aproximativă

$$C_{ir} \approx \sqrt{C_s C_p} \tag{2.118 a}$$

care poartă numele de *capacitate de intrare a transformatorului*.

La determinarea repartiției tensiunii în lungul înfășurării, se deosebesc cazurile cînd sfîrșitul înfășurării este legat la pămînt și cînd sfîrșitul înfășurării este izolat față de pămînt. În ambele cazuri, tensiunea se consideră aplicată între borna de intrare A și pămînt. Toate celelalte cazuri se pot reduce la acestea.

Repartiția tensiunii în lungul înfășurării depinde în mare măsură atît de cazurile menționate, adică dacă înfășurarea este cu nulul legat la pămînt sau nulul este izolat, cît și de capacitățile C_s și C_p prin raportul $\alpha = \sqrt{\frac{C_p}{C_s}}$ (fig. 2.60).

Din figura 2.60 a și b rezultă că pentru limitele obișnuite ale produsului αl ($\alpha l \geq 5$), repartiția tensiunii în momentul inițial nu depinde sensibil de faptul că sfîrșitul este legat la pămînt sau izolat (l, este lungimea înfășurării).

De asemenea se constată că în ambele cazuri, gradientul de tensiune $\left(\frac{du}{dx}\right)$ la începutul înfășurării este același și anume de „αl" ori mai mare decît gradientul corespunzător unei repartiții uniforme a tensiunii, ceea ce înseamnă că, din punct de vedere al izolației, primele spire (de la începutul înfășurării) sînt mult mai solicitate, pe ele repartizîndu-se o tensiune a undei mult mai mare, decît spre sfîrșitul înfășurării.

B. **Mijloace de protecție a transformatoarelor la supratensiuni.** Pentru protecția transformatoarelor la supratensiuni, sînt utilizate atît mijloace de reducere a amplitudinii undei de supratensiune care pătrunde în transformator, cît și mijloace destinate îmbunătățirii distribuției supratensiunilor de-a lungul înfășurării.

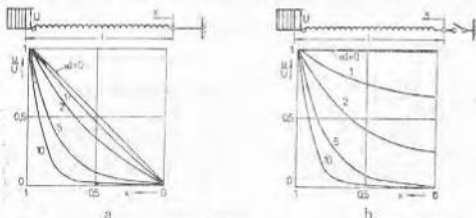


Figura 2.60. Repartiția tensiunii undei de șoc, în momentul inițial, în lungul înfășurării transformatorului, pentru diferite valori ale produsului αl: a — sfîrșitul legat la pămînt; b — sfîrșitul izolat.

Din prima categorie, fac parte descărcătoarele cu rezistență variabilă în raport cu tensiunea aplicată și eclatoarele montate pe borna de intrare și cuva transformatorului.

Descărcătoarele cu rezistență variabilă se conectează între linia electrică și pămînt. La valoarea nominală a tensiunii liniei, rezistența electrică a descărcătorului este foarte mare. Odată cu apariția supratensiunilor, rezistența descărcătorului scade rapid și sarcina electrică a liniei se descarcă în pămînt.

Eclatoarele se montează pe borna de intrare și cuva transformatorului. La apariția unei supratensiuni mai mari decît tensiunea de străpungere a aerului dintre eclatoare, se produce un arc electric între eclatoare și sarcina electrică se descarcă la masă.

Măsurile constructive privind îmbunătățirea repartiției supratensiunilor în lungul înfășurărilor au ca scop să uniformizeze repartiția supratensiunilor prin reducerea capacităților C_p față de masă și creșterea capacităților C_s între spire (fig. 2.59 și fig. 2.60). Cu toate acestea, repartiția tensiunii în lungul înfășurării nu se poate uniformiza și, cum s-a menționat mai sus, primele spire sînt suprasolicitate electric, practica arătînd că peste 52% din toate străpungerile transformatoarelor s-au produs la spirele de intrare ale înfășurării. Acest lucru a impus *întărirea izolației* la primele (5—10)% din spirele înfășurării, care au o izolație dublă față de restul spirelor. Dar, odată cu creșterea izolației acestor spire, crește distanța dintre ele și scade capacitatea longitudinală C_s, accentuîndu-se repartiția neuniformă a supratensiunii. De aceea, mai potrivită ar fi utilizarea unei izolații superioare pentru spirele de intrare sau eventual a unei izolații cu permitivitate (constantă dielectrică) mai mare pentru a rămîne, pe cît posibil, neschimbată capacitatea dintre spire. Sporirea capacității dintre spire se poate obține și prin utilizarea unor *conductoare de înălțime mai mare* în zona de intrare (fig. 2.61 a).

Creșterea capacității dintre spire la înfășurările în galeți se obține și prin prevederea unui *inel de gardă* (fig. 2.61 b).

Acesta este confecționat dintr-un inel izolant pe care se înfășoară o bandă din țesătură din fire metalice, conectată la borna de intrare a înfășurării. Inelul de gardă este astfel format încît banda metalică nu formează o spiră

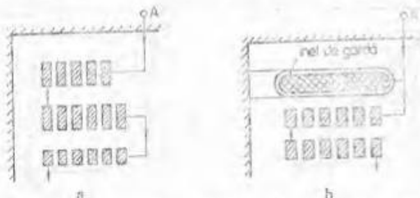


Figura 2.61. Metode de sporire a capacității la începuturile înfășurării în galeți: a — galeți de intrare cu conductoare de înălțime mai mare; b — inel de gardă și conexiunea lui

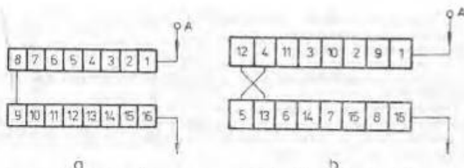


Figura 2.62. Moduri de realizare a începuturilor înfășurărilor continue în galeți: a — cu galeți obișnuiți; b — cu galeți având spirele intercalate.

în scurtcircuit. Banda este din țesătură pentru a evita apariția unor pierderi suplimentare provocate de cîmpul magnetic de scăpări la funcționarea în sarcină a transformatorului.

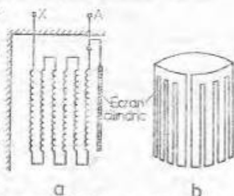


Figura 2.63. Înfășurare cilindrică stratificată cu ecran cilindric (a) și forma ecranului (b).

La înfășurările continue în galeți ale transformatoarelor mari, se utilizează *intercalarea spirelor* la primii galeți. În acest caz, spirele galeților nu mai sînt așezate alăturat (fig. 2.62 a), ci sînt intercalate cu alte spire de la galetul vecin (fig. 2.62 b).

Intercalarea se obține simplu prin depănarea, unei perechi de galeți cu două conductoare în paralel care, după depănare, se conectează în serie. Prin intercalarea spirelor se sporește capacitatea dintre spirele relativ îndepărtate ale porțiunii de înfășurare dinspre borna de intrare.

La înfășurările cilindrice stratificate se pot utiliza *ecrane cilindrice*, metalice, așezate în interiorul înfășurării și conectate la borna de intrare (fig. 2.63). Ecranul este secționat după generatoare, pentru a nu se forma o spiră în scurtcircuit. Totodată, ecranul mai prezintă tăieturi după diferite generatoare pentru a evita apariția unor pierderi suplimentare datorită cîmpului magnetic de scăpări la funcționarea în sarcină.

2.8. ÎNCERCĂRILE TRANSFORMATOARELOR [11, 14, 16]

Principalele încercări la care sînt supuse transformatoarele sînt:

— verificarea raportului de transformare;
— verificarea grupei de conexiuni;
— măsurarea în curent continuu a rezistenței electrice a înfășurărilor;
— verificarea rigidității dielectrice a izolațiilor cu tensiune sinusoidală aplicată;
— încercarea la impuls de tensiune;
— încercarea cu tensiune indusă;
— măsurarea pierderilor și a curentului la funcționarea în gol, la tensiunea nominală;

— măsurarea pierderilor şi a tensiunii de scurtcircuit;
— încercarea la încălzire;
— încercarea la scurtcircuit brusc;
— verificarea cuvei la suprapresiune;
— măsurarea rigidităţii dielectrice şi a unghiului de pierderi dielectrice ale uleiului.

Valorile măsurate ale parametrilor de funcţionare, garantate prin standardele sau normele tehnice de produs pentru regimul nominal al transformatoarelor, trebuie să se încadreze în limitele prevăzute în STAS 1703/1-80, redate succint şi în tabelul 2.2.

TABELUL 2.2

Abateri limită la valorile garantate (Extras din STAS 1703/1-80).

Mărimi	Abateri limită
1. a) Pierderi totale b) Pierderi parţiale (vezi observaţia 1)	+10% din pierderile totale +15% din fiecare din pierderile parţiale, cu condiţia ca să nu depăşească pierderile totale.
2. Raportul de transformare în gol, pentru priza principală (raportul de transformare nominal). (vezi observaţia 3)	Cea mai mică dintre următoarele valori: a) ±0,5% din raportul de transformare garantat; b) ±1/10 din tensiunea de scurtcircuit reală la curentul nominal, exprimată în procente (vezi observaţia 2).
3. Tensiunea de scurtcircuit la curentul nominal (pentru priza principală) a) dacă priza principală este priza mediană sau una din cele două prize mediane în cazul: — unui transformator cu două înfăşurări — unui transformator cu mai mult de două înfăşurări b) în celelalte cazuri	±10% din tensiunea de scurtcircuit garantată pentru această priză. ±10% din tensiunea de scurtcircuit garantată pentru o pereche specificată de înfăşurări; ±15% din tensiunea de scurtcircuit garantată pentru o a doua pereche specificată de înfăşurări. Pentru celelalte perechi de înfăşurări, abaterile trebuie să fie stabilite în documentele tehnice normative corespunzătoare. Vezi STAS 1703/4-80.
4. Impedanţa de scurtcircuit pentru o priză oarecare	Superioară sau egală cu valoarea indicată la pct. 3 a (vezi şi STAS 1703/4-80).
5. Curentul de funcţionare în gol	+30% din curentul de funcţionare în gol garantat.
6. Nivelul de zgomot 10% din pierderile totale	+3 dB

OBSERVAŢII

1. În cazul transformatoarelor cu mai mult de două înfăşurări, abaterile limită la pierderi se referă la fiecare pereche de înfăşurări, dacă nu se indică altfel prin documentele tehnice normative corespunzătoare.

2. Varianta b pentru raportul de transformare nu se aplică în cazul autotransformatoarelor şi al transformatoarelor survoltoare-devoltoare pentru care, datorită valorii mici a impedanţei, abaterea limită este foarte mică.

3. Abaterile la raportul de transformare pentru alte prize decît cea principală trebuie să fie precizate în documentele tehnice normative corespunzătoare.

2.8.1. VERIFICAREA RAPORTULUI DE TRANSFORMARE

După cum se vede din tabelul 2.2, funcționarea corectă a transformatoarelor la cuplarea în paralel impune, între alte condiții, abateri foarte mici pentru valoarea raportului de transformare.

Raportul de transformare reprezintă raportul dintre tensiunile electromotoare E_1 și E_2, respectiv dintre numărul de spire din înfășurarea primară (w_1) și numărul de spire din înfășurarea secundară (w_2). Practic, acesta se consideră egal și cu raportul tensiunilor care se măsoară la funcționarea în gol, dacă cele două înfășurări au aceeași conexiune (v. și rel. (2.40))

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{01}}{U_{02}}. \tag{2.119}$$

Verificarea raportului de transformare se face pentru toate treptele de reglaj ale înfășurărilor și pe toate fazele, pentru prizele accesibile prin comutare; această verificare se face atît înainte, cît și după asamblarea completă a transformatorului.

Pentru determinarea experimentală a raportului de transformare indiferent de metoda folosită, una din înfășurări se alimentează. Cînd, de pildă, se alimentează înfășurarea primară, tensiunea electromotoare E_1 nu este riguros egală cu tensiunea de alimentare U_{01}, din cauza căderii de tensiune provocată de curentul de funcționare în gol I_{01}. Raportul de transformare măsurat (k_m), ca raport al tensiunilor de funcționare în gol, în cazul cînd se neglijează rezistența ohmică, este

$$k_m = \frac{U_{01}}{U_{02}} = k\left(1 + \frac{I_{01}}{E_1} X_{\sigma 1}\right), \tag{2.119 a}$$

unde:

k este valoarea exactă a raportului de transformare;
I_{01} — curentul de funcționare în gol la tensiunea de alimentare U_{01};
E_1 — t.e.m. în înfășurarea primară alimentată;
$X_{\sigma 1}$ — rectanța de scăpări, pe fază, pe care apare căderea de tensiune datorată curentului I_{01} (v. rel. (2.31)).

Așadar, valoarea măsurată a raportului de transformare este întotdeauna mai mare, decît valoarea calculată. Abaterea este cu atît mai mică cu cît raportul $\frac{I_{01}}{E_1}$ și reactanța $X_{\sigma 1}$, vor fi mai mici. Din figura 2.64 rezultă că ten-

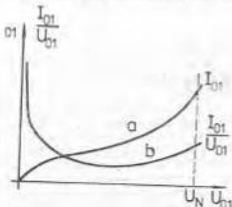


Figura 2.64. Variația curentului de funcționare în gol în funcție de tensiunea de alimentare: a — valoare absolută I_{01}; b — valoare raportată I_{01}/U_{01}.

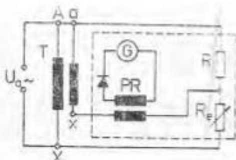


Figura 2.65. Schema de măsurare a raportului de transformare prin metoda compensării: A, X, a, x — borne ale înfășurărilor transformatorului de măsurat; G — galvanometru; PR — punte de redresare; R — rezistență fixă; R_e — rezistență de echilibrare.

siunea de alimentare la măsurarea raportului de transformare trebuie aleasă în așa fel încît să se evite valori mai mici de 1% $\left(\text{cînd raportul } \frac{I_{01}}{U_{01}} \text{ crește foarte mult din cauza valorilor foarte mici ale tensiunii de alimentare}\right)$ sau mai mari de 50% din tensiunea nominală $\left(\text{cînd crește, de asemenea raportul } \frac{I_{01}}{U_{01}}\right)$.

Metodele industriale pentru verificarea raportului de transformare sînt:

— metoda celor două voltmetre;

— metoda transformatorului etalon diferențial;

— metoda compensării (metoda punții).

În cadrul ultimei metode, care este cea mai folosită datorită preciziei ridicate ($\pm 0{,}1\%$), comodității și operativității ei, măsurarea raportului se face cu o punte prevăzută cu compensare, care asigură citirea directă a raportului cu cel puțin patru cifre semnificative sau indică abaterea procentuală față de raportul calculat. Instalația se compune dintr-un compensator în curent alternativ, la care înfășurarea de joasă tensiune a transformatorului e compensată cu o parte a tensiunii înalte a aceluiași transformator, obținută de la un divizor rezistiv de tensiune (fig. 2.65).

Raportul de transformare, potrivit figurii 2.65, este dat de relația

$$k = \frac{U_{01}}{U_{02}} = \frac{R + R_e}{R}. \qquad (2.120)$$

Ca indicator de zero este folosit galvanometrul G, care este introdus într-o schemă de amplificare în curent continuu, pentru a se obține o sensibilitate mai bună.

În cazul transformatoarelor cu tensiuni nominale peste 20 kV sînt necesare tensiuni de alimentare peste 220 V (circa 2 200 V). În consecință, schema din figura 2.65 se completează cu transformatoare coborîtoare de tensiune, de precizie ridicată (fig. 2.66). Pentru a elimina eroarea produsă de căderea de tensiune datorată curentului de funcționare în gol, la transformatorul cu trei înfășurări se poate alimenta a treia înfășurare (fig. 2.67), iar la transformatoarele trifazate se alimentează o altă fază, cînd bornele sînt accesibile, pentru conectarea separată a fazelor.

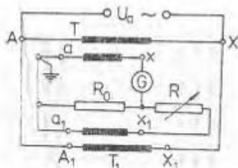


Figura 2.66. Schema de principiu pentru măsurarea raportului de transformare la transformatoare cu tensiuni nominale peste 20 kV: T — transformatorul de încercat; T_1 — transformator coborîtor de tensiune.

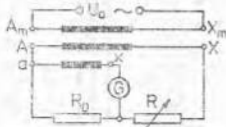


Figura 2.67. Schemă de principiu pentru măsurarea raportului de transformare prin metoda comparației la transformatorul cu trei înfășurări și cu alimentarea înfășurării neîncercate.

2.8.2. VERIFICAREA GRUPEI DE CONEXIUNI

Conectarea galvanică a fazelor unui transformator se poate efectua în mai multe variante care constituie grupele de conexiuni în sistemul orar de definire. Cum s-a arătat la paragraful 2.4.2 modul de conectare în stea, în triunghi sau în zigzag a înfășurărilor de fază, se indică prin Y, D, respectiv Z pentru înfășurarea de înaltă tensiune (I.T.) și prin literele y, d sau z pentru înfășurarea de joasă tensiune (J.T.). Dacă punctul neutru al înfășurării în stea sau în zigzag este scos pe capac sau la o cutie de borne, indicația, potrivit STAS 1703/4-80, trebuie să fie Y_N sau Z_N, și respectiv y_n sau z_n.

Numărul (grupa) multiplicat cu 30° indică defazajul între fazorul origine, care corespunde înfășurării de I.T. și fazorul tensiunii de linie omoloagă a înfășurării de tensiune medie, respectiv de tensiune joasă, corespunzător aceleiași faze (fig. 2.68).

Defazajul are sens invers trigonometric, iar sensurile de depănare (bobinare) ale tuturor înfășurărilor se consideră aceleași.

În figura 2.68 a, se arată că, în ipoteza aceluiași sens de bobinare pentru ambele înfășurări, fazorul tensiunii de fază a înfășurării de J.T. (de la unul

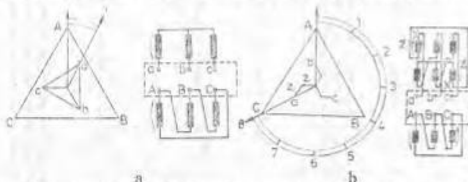


Figura 2.68. Măsurarea unghiului de defazaj: a — grupa de conexiuni Dy-1; b — grupa de conexiuni Dz-8.

TABELUL 2.3

Grupele de conexiuni ale transformatoarelor.
U — grupe de conexiuni uzuale.

D,d0	Y,y0 U	D,z0
D,y1	Y,d1	Y,z1
D,d2	Y,y0,d11 U	D,z2
D,d4	Y,d11,d11 U	D,z4
D,y5 U	Y,d5 U	Y,z5
D,d6	Y,y6	D,z6
D,y7	Y,d7	Y,z7
D,d8	I,i0 U	D,z8
D,d10	$I,i_m,i0$ U	D,z10
D,y11 U	Y,d11 U	Y,z11 U

stelei la borna de ieșire a) coincide ca direcție și sens cu fazorul CA al înfășurării de I.T., corespunzător aceleiași faze. Rezultă defazajul între tensiunile de fază ale celor două înfășurări de 30°, adică grupa de conexiuni Dy-1.

În figura 2.68 b, construcția grafică pentru determinarea grupei de conexiuni se face astfel:

— După cum s-a precizat, se ia ca referință înfășurarea de I.T. (în triunghi), prin fazorul tensiunii fazei A. Fazorul tensiunii aceleiași faze a înfășurării de J.T. (conectată în zigzag) este suma fazorială a tensiunilor a două semiînfășurări, notate arbitrar în figură cu X și Y și are originea în nulul semiînfășurărilor conectate în stea. Fazorul tensiunii semiînfășurării X, notat cu Z_1, are direcția și sensul fazorului BC, iar fazorul tensiunii semiînfășurării Y, notat cu Z_2, are direcția și sensul fazorului AC. În urma însumării rezultă defazarea tensiunilor de fază ale celor două înfășurări de $8 \times 30° = 240°$, ceea ce corespunde grupei de conexiuni Dz-8.

Simbolizarea grupelor de conexiuni ale transformatoarelor trifazate cu înfășurări separate este arătată în tabelul 2.3; literele I și i reprezintă conexiunea transformatoarelor monofazate.

Pentru transformatoarele cu mai mult de două înfășurări fazorul de referință rămîne cel al înfășurării de I.T. și simbolul referitor la această înfășurare este dat primul. Celelalte simboluri urmează în ordinea descrescătoare a tensiunilor nominale ale celorlalte înfășurări. De exemplu, un transformator avînd următoarele înfășurări:

— o înfășurare de 123 kV în stea;
— o înfășurare de 36 kV în stea, cu neutrul scos;
— o înfășurare de 7,2 kV în triunghi,

poate avea grupa de conexiuni simbolizată prin Y, y_n^0, d11.

Cele mai folosite metode de verificare experimentală a grupei de conexiuni sînt următoarele:

— metoda compensării (metoda punții);
— metoda directă (cu fazmetrul);
— metoda celor două voltmetre;
— metoda alimentării în curent continuu.

Prin *metoda compensării* verificarea grupei de conexiuni se face simultan cu măsurarea raportului de transformare cu instalații de compensare.

Pentru *metoda directă* se montează un cosfimetru monofazat cu bobina de curent conectată la bornele înfășurării nealimentate printr-un reostat de limitare a curentului, iar bobina de tensiune conectată la bornele înfășurării alimentate cu tensiune redusă. Reostatul R se reglează astfel ca prin fazmetru să circule un curent mic, sub 5 A (fig. 2.69). Se recomandă folosirea unui cosfimetru cu patru cadrane și cu diviziuni din 30 în 30°, notate de la 1 la 12, gradația indicată reprezentînd chiar grupa de conexiuni. La determinarea grupei de conexiuni a transformatoarelor trifazate se efectuează cel puțin două măsurări

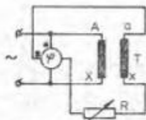


Figura 2.69. Măsurarea grupei de conexiuni prin metoda directă: T — transformator încercat; φ — fazmetru; R — reostat reglabil.

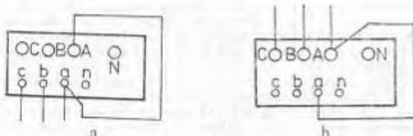


Figura 2.70. Schema de legături pentru determinarea grupei de conexiuni alimentînd transformatorul trifazat pe J.T. (a), respectiv pe I.T. (b).

(pentru două perechi de borne de linie corespunzătoare). Această metodă prezintă avantaje în cadrul verificărilor de serie mare intîlnite la transformatoarele de putere mică și mijlocie.

Pentru verificarea grupei de conexiuni prin *metoda celor două voltmetre* se conectează împreună bornele a și A, iar transformatorul se alimentează în gol pe oricare din cele două înfășurări (fig. 2.70).

În cazul transformatoarelor trifazate se măsoară succesiv tensiunea la bornele b—B, b—C, c—B și c—C, iar în cazul transformatoarelor monofazate tensiunea între bornele x—X. Tensiunile măsurate se compară cu tensiunile corespunzătoare teoretice, calculate cu relațiile din tabelul 2.4, în care U_1 este tensiunea de linie măsurată pe partea de alimentare, iar $k = U_{AB}/U_{ab}$ este raportul de transformare. Dacă valorile măsurate coincid cu valorile calculate cu relațiile corespunzătoare unei anumite grupe (în limitele toleranței lui k), atunci transformatorul corespunde grupei de conexiuni respective, indicate în coloana a 3-a (pentru conexiunile făcute înfășurărilor).

Metoda alimentării în curent continuu se bazează pe stabilirea sensului t.e.m. induse în înfășurări la conectarea sau deconectarea unui curent continuu de valoare redusă într-una din cele două înfășurări. Aparatul folosit la determinarea sensului t.e.m. induse poate fi orice voltmetru magnetoelectric cu scala 0—3 V sau 0—100 mV, clasa de precizie neprezentînd importanță, iar ca sursă de curent continuu una sau mai multe baterii telefonice de 1,5 V (înseriate).

Metoda se folosește cu precădere în verificarea grupei de conexiuni 6 sau 12 la transformatoarele monofazate (fig. 2.71). Mai întîi se leagă voltmetrul V

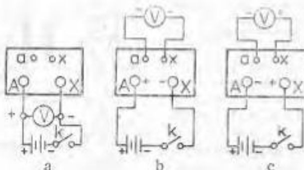


Figura 2.71. Scheme de legături pentru determinarea grupei de conexiuni a transformatoare monofazate, cu indicarea polarității în primar (a) și în secundar la conectare pentru grupa *Ii*-12 (b), respectiv pentru grupa *Ii*-6 (c).

TABELUL 5.4

Formule pentru calculul tensiunilor, care se compară cu tensiunile măsurate, pentru verificarea grupei de conexiuni.

GRUPA	Defazajul tensiunilor	Grupa de conexiuni	Diagrama fazorială a tensiunilor	Alimentat la bornele de joasă tensiune (U_l = tensiune de linie)			
				U_{b-B} (U_{x-X})	U_{b-C}	U_{c-B}	U_{c-C}
0	0°	Y,y0 D,d0 D,z0 (I,I0)	B, b, A,a, c, C	$U_l(k-1)$	$U_l\sqrt{k^2-k+1}$	$U_l\sqrt{k^2-k+1}$	$U_l(k-1)$
1	30°	Y,d1 D,y1 Y,z1	B, b, A,a, c, C	$U_l\sqrt{k^2-k\sqrt{3}-1}$	$U_l\sqrt{k^2-k\sqrt{3}+1}$	$U_l\sqrt{k^2+1}$	$U_l\sqrt{k^2-k\sqrt{3}+1}$
2	60°	D,d2 D,z2	B, b, A,a, c, C	$U_l\sqrt{k^2-k+1}$	$U_l(k-1)$	$U_l\sqrt{k^2+k+1}$	$U_l\sqrt{k^2+k+1}$
4	120°	D,d4 D,z4	B, A,a, c, b, C	$U_l\sqrt{k^2+k+1}$	$U_l\sqrt{k^2-k+1}$	$U_l(k+1)$	$U_l\sqrt{k^2+k+1}$
5	150°	Y,d5 D,y5 Y,z5	B, A,a, c, b, C	$U_l\sqrt{k^2+k\sqrt{3}+1}$	$U_l\sqrt{k^2+1}$	$U_l\sqrt{k^2+k\sqrt{3}+1}$	$U_l\sqrt{k^2+k\sqrt{3}+1}$
6	180°	Y,y6 D,d6 D,z6 (I,I6)	B, A,a, c, b, C	$U_l(k+1)$	$U_l\sqrt{k^2+k+1}$	$U_l\sqrt{k^2+k+1}$	$U_l(k+1)$
7	210°	Y,d7 D,y7 Y,z7	B, c, b, A,a, C	$U_l\sqrt{k^2+k\sqrt{3}+1}$	$U_l\sqrt{k^2+k\sqrt{3}+1}$	$U_l\sqrt{k^2+1}$	$U_l\sqrt{k^2+k\sqrt{3}+1}$
8	240°	D,d8 D,z8	B, c, b, A,a, C	$U_l\sqrt{k^2+k+1}$	$U_l(k+1)$	$U_l\sqrt{k^2-k+1}$	$U_l\sqrt{k^2+k+1}$
10	300°	D,d10 D,z10	B, b, c, A,a, C	$U_l\sqrt{k^2-k+1}$	$U_l\sqrt{k^2+k+1}$	$U_l(k-1)$	$U_l\sqrt{k^2-k+1}$
11	330°	Y,d11 D,z11 Y,z11	B, b, c, A,a, C	$U_l\sqrt{k^2-k\sqrt{3}+1}$	$U_l\sqrt{k^2+1}$	$U_l\sqrt{k^2-k\sqrt{3}+1}$	$U_l\sqrt{k^2-k\sqrt{3}+1}$

în primar pentru determinarea polarităţii bornelor lui (fig. 2.71 a). Se leagă apoi în secundar şi dacă la conectarea întreruptorului K acul voltmetrului deviază în sensul scalei, grupa de conexiuni este 0 sau 12 (fig. 2.71 b), iar dacă la conectarea lui K acul voltmetrului deviază în sens opus scalei, grupa de conexiuni este 6 (fig. 2.71 c).

2.8.3. MĂSURAREA REZISTENŢELOR ÎNFĂŞURĂRILOR ÎN CURENT CONTINUU

Această încercare defineşte calitatea unui transformator şi de aceea reprezintă o probă individuală. Comparaţia dintre rezistenţele indicate în fişa de calcul şi cele măsurate permite:

— controlul calităţii cuprului sau aluminiului privind rezistivitatea şi secţiunea, impuse;

— verificarea calităţii sudurilor sau lipiturilor la conexiuni;

— verificarea calităţii contactelor de la comutatorul de reglaj al tensiunii;

— depistarea întreruperilor sau scurtcircuitelor în conductoarele bobinelor.

Rezistenţa reală a înfăşurărilor trebuie cunoscută la calculul pierderilor Joule, pentru recalcularea corectă a pierderilor de scurtcircuit la temperatura convenţională. În cazul transformatoarelor trifazate, este necesară compararea rezistenţelor măsurate pe fiecare fază, abaterea între ele trebuind să nu depăşească 2—3% [11].

Atunci cînd transformatoarele sînt complet montate şi au înfăşurările conectate în triunghi sau stea cu neutrul inaccesibil, se măsoară direct rezistenţele între bornele de linie accesibile, calculîndu-se rezistenţele pe faze.

La transformatoarele care au înfăşurări cu prize de reglaj, rezistenţa se va măsura pe toate prizele, urmărind variaţia rezistenţei de la o priză la alta pentru sesizarea eventualelor defecte.

Înainte de măsurare şi în timpul măsurării este necesar ca temperatura să fie aceeaşi la toate nivelele şi să fie determinată cît mai exact, încercarea executîndu-se cu transformatorul în stare practic rece. Pentru realizarea egalizării temperaturii trebuie ca transformatorul să fie scos de sub tensiune pe o perioadă de minimum 3—10 ore, în funcţie de puterea transformatorului.

Pentru recalcularea rezistenţei de la temperatura la care s-a făcut măsurătoarea t_m, la temperatura convenţională în stare practic caldă t_N, se foloseşte relaţia

$$R_{tN} = R_{tm} \frac{t_N + 235}{t_m + 235}, \qquad (2.121)$$

relaţia fiind valabilă atît pentru înfăşurări din *Cu*, cît şi din *Al*.

Majoritatea normelor şi standardelor prevăd pentru temperatura convenţională în stare caldă t_N valoarea de 75°C (80°C cînd circulaţia uleiului este dirijată forţat) la transformatoarele în ulei (în clasa *A* din cauza uleiului) şi 115°C la transformatoarele uscate (în clasă *F*).

Rezistența înfășurărilor în curent continuu se poate determina prin:
— metoda voltmetru-ampermetru;
— metoda punții.

Metoda voltmetru-ampermetru este cea mai folosită datorită simplității ei. Se bazează pe legea lui Ohm

$$R_x = \frac{U}{I} [\Omega], \tag{2.122}$$

unde:
U este căderea de tensiune măsurată la bornele înfășurării în regim stabilizat, în V;
I — curentul prin înfășurare în regim stabilizat, în A;
R_x — rezistența ce trebuie determinată.

Dezavantajul principal al metodei constă în faptul că citirea aparatelor nu se poate face decît după perioada tranzitorie inițială.

În perioada tranzitorie, la aplicarea tensiunii U curentul I este mic, deoarece pe lîngă căderea de tensiune U_R, înfășurarea fiind o reactanță inductivă, mai apare și o tensiune indusă u_z, care întîrzie stabilirea curentului, relația tensiunilor, în perioada tranzitorie, fiind (se notează cu litere mici, fiind valori momentane)

$$u = u_R + u_z = iR + u_z. \tag{2.123}$$

După stabilizare, $u_z = 0 \rightarrow U = IR$. Pentru obținerea unui regim stabil trebuie să se atingă domeniul saturației prin alimentarea cu o tensiune care să creeze un curent prin rezistența R a înfășurării, cu 20% mai mare decît curentul nominal de funcționare în gol.

Timpul t, după care curentul se consideră stabilizat, se determină cu relația

$$t \approx 1{,}5 \frac{U_N \sqrt{2}}{\omega U} [s], \tag{2.124}$$

în care:
U_N este tensiunea nominală a înfășurării încercate, în V;
U — tensiunea sursei de alimentare în curent continuu, în V;
$\omega = 2\pi f$ — pulsația nominală a transformatorului.

Pentru micșorarea acestui timp, se recomandă utilizarea unei surse de alimentare în curent continuu cu tensiune cît mai mare, avînd grijă să se crească rezistența exterioară a circuitului pentru a limita valoarea curentului.

În cazul măsurării rezistențelor de valoare mică (de ordinul ohmilor sau sub un ohm), consumul voltmetrului devine neglijabil și este mai precisă măsurarea în schema *aval* (fig. 2.72 a). Valoarea rezistenței măsurate R_x, se obține cu relația

$$R_x = \frac{U}{I - \frac{U}{R_v}} [\Omega], \tag{2.125}$$

în care:
U este tensiunea citită la voltmetru, în V;
I — curentul citit la ampermetru, în A;
R_v — rezistența internă a milivoltmetrului, în Ω.

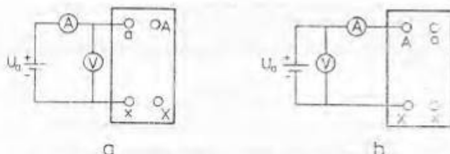


Figura 2.72. Schema pentru măsurarea rezistenței înfășurărilor prin metoda voltmetru-ampermetru pentru: a — rezistențe de valori mici; b — rezistențe de valori mari.

În cazul rezistențelor de valoare mare nu se mai poate neglija consumul voltmetrului și, devenind neglijabilă rezistența ampermetrului, se impune schema *amonte* (fig. 2.72 b).

Prin *metoda punții* măsurarea rezistențelor ohmice se face cu punțile simple de tip Wheatstone sau duble de tip Thomson. Puntea Wheatstone se folosește numai la măsurarea rezistențelor peste 1Ω, prezentînd neajunsul că la rezistența care se măsoară se adaugă rezistența conductoarelor de legătură și a contactelor.

Puntea Thomson este cel mai precis aparat pentru măsurarea rezistențelor mici (pînă la 0,0005 Ω) întîlnite la înfășurările transformatoarelor de putere mare și foarte mare și tensiuni relativ mici.

2.8.4. ÎNCERCAREA CU TENSIUNE APLICATĂ

După verificarea stării izolației prin metode nedistructive pe platforma de încercare a fabricii constructoare, transformatorul este supus la o serie de încercări distructive, cu tensiune înaltă sinusoidală și de impuls.

Există două tipuri de încercări cu tensiune sinusoidală:

— încercarea cu tensiune aplicată, cînd tensiunea se aplică înfășurării de încercat a transformatorului de la o sursă exterioară;

— încercarea cu tensiune indusă, obținută chiar de la transformatorul de încercat.

Instalațiile pentru producerea tensiunii sinusoidale cuprind, de obicei, o sursă de alimentare cu tensiune reglabilă, un transformator de încercare pentru încercarea cu tensiune aplicată și transformatoare intermediare pentru încercarea cu tensiune indusă.

Curentul de scurtcircuit pe partea de tensiune înaltă, trebuie să fie suficient pentru a produce un defect vizibil prin străpungerea izolației interne sau conturnarea celor externe, iar puterea de scurtcircuit a instalației de încercare trebuie să fie suficientă pentru ca să nu se producă fenomene de autoexcitație [14].

Încercarea cu tensiune aplicată trebuie să se execute cu o tensiune alternativă monofazată, avînd forma cît mai apropiată de cea sinusoidală și o frecvență convenabilă, dar nu mai mică de 40 Hz. Valoarea de vîrf a tensiunii

de încercare împărțită la $\sqrt{2}$, trebuie să fie egală cu valoarea eficace a tensiunii de încercare. Pentru transformatoarele cu izolație uniformă valoarea tensiunii aplicate (*TA*) este cea prevăzută în tabelul 2.5, conform STAS 1703/3-80.

TABELUL 2.5

Valorile tensiunilor de încercare pentru transformatoarele de putere (Extras din STAS 1703/3-80).

Domeniul de tensiune	Tensiunea cea mai ridicată a înfășurării, U_m (valoare eficace) [kV]	Tensiunea nominală de ținere la impuls de tensiune de trăsnet (*ITT*), undă plină sau tăiată (valoare de vîrf) [kV]	Tensiunea nominală de ținere la impuls de tensiune de comutație (*ITC*), undă plină (valoare de vîrf) [kV]	Tensiunea nominală de ținere pentru încercarea de scurtă durată cu tensiune aplicată (*TA*) și tensiune indusă (*TI*) la frecvență industrială (valoare eficace) [kV]
A	3,6	40	—	16
	7,2	60	—	22
	12,0	75	—	28
	17,5	95	—	38
	24,0	125	—	50
	30,0	150	—	60
	42,0	195	—	80
B	72,5	325	—	140
	123	450	—	185
	245	650	—	360*
C	420	1 425	1 050	630

* Pentru izolatoarele de trecere încercate separat, tensiunea de încercare este de 395 kV.

La transformatoarele avînd una sau mai multe înfășurări cu izolație neuniformă, tensiunile de încercare sînt determinate, atît la tensiunea aplicată cît și la cea indusă, de înfășurarea pentru care valoarea U_m (tensiunea cea mai ridicată a înfășurării) este cea mai ridicată.

Încercarea trebuie să înceapă de la o tensiune egală cu cel mult o treime din tensiunea de încercare specificată, tensiunea fiind adusă la valoarea impusă atît de repede cît permite măsurarea. La sfîrșitul încercării se reduce rapid tensiunea la o valoare mai mică decît o treime din tensiunea de încercare, înainte de a o întrerupe (STAS 1703/3-80).

În figura 2.73 este reprezentată schema de principiu a unei instalații de încercare la frecvență industrială. În schemă sînt indicate elementele de măsură și de protecție. Alimentarea transformatorului de încercare se aplică transformatorului de încercat, verificîndu-se izolația fiecărei bobine a transformatorului față de masă (față de miez, față de cuvă, față de schelă etc.) și izolația față de celelalte bobine, legate împreună la masă. Pentru aceasta,

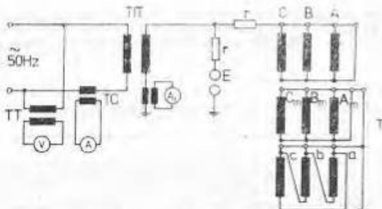


Figura 2.73. Schema de principiu a unei instalații de încercare la frecvență industrială [11]: *TIT* — transformator de înaltă tensiune; *T* — transformator de încercat; *r* — rezistență de protecție; *TC* — transformator de curent; *TT* — transformator de tensiune; *E* — eclator cu sfere.

bornele bobinei încercate sînt legate împreună la borna de înaltă tensiune, iar bornele bobinelor neîncercate sînt conectate împreună la borna de legare la pămînt a transformatorului care, la rîndul ei, e conectată la pămînt.

Pentru controlul și supravegherea încercării, schema este prevăzută cu două ampermetre, dintre care unul (A), măsoară curentul I din înfășurarea primară a transformatorului de încercare, iar celălalt (A_1) măsoară, prin intermediul unui transformator de curent, curentul I_c din bobina secundară a transformatorului de înaltă tensiune. Tensiunea de încercare se va aplica timp de 60 secunde.

În cazul străpungerii transformatorului care se încearcă, deconectarea sursei de alimentare trebuie să se facă printr-un întreruptor automat, cu acțiune rapidă, iar generatorul de alimentare trebuie dezexcitat printr-un automat de dezexcitare rapidă. Acest lucru este necesar pentru a limita amplitudinea oscilațiilor proprii ale circuitului de înaltă tensiune, iar distrugerile provocate de străpungere să nu fie prea mari, putîndu-se stabili cauzele străpungerii.

Se consideră că transformatorul a corespuns la încercarea cu tensiune aplicată dacă, în timpul încercării, nu s-au produs străpungeri sau conturnări ale izolației sesizate vizual, auditiv, din indicațiile aparatelor de măsură (voltmetru, ampermetru) sau din datele aparatelor de înregistrare. Străpungerea netă, prin ulei, a izolației (de exemplu străpungerea izolației față de jug, străpungerea sau conturnarea pieselor izolante de consolidare a conexiunilor etc.) este însoțită de un zgomot surd în cuva transformatorului, de creșterea curentului absorbit de transformatorul încercat și de acționarea declanșatorului automat al stației de tensiune înaltă. Străpungerea netă a izolației de ulei și hîrtie sau a intervalelor de ulei (de exemplu, a izolației dintre înfășurări, a izolației dintre înfășurare și cuva transformatorului) este însoțită de un zgomot puternic, ascuțit, în interiorul cuvei, de o creștere bruscă a curentului absorbit și de trepidarea acului indicator al voltmetrului.

2.8.5. ÎNCERCAREA CU TENSIUNE INDUSĂ

Transformatoarele de putere pentru tensiuni foarte înalte (≥ 110 kV), ca și unele tipuri de transformatoare pentru 35 kV se execută, în general cu izolație parțial gradată. Acest sistem de izolație presupune o tensiune de încercare pentru bobina de linie a transformatorului și o altă tensiune de încercare pentru borna de neutru și deci este imposibilă încercarea cu tensiune aplicată. În acest caz, izolația principală a înfășurării se încearcă numai prin tensiune indusă.

Încercarea se execută diferit, în funcție de tipul izolației înfășurării și de mărimea tensiunii maxime U_m, dintre faze. Valoarea tensiunii de încercare, care rezultă din valoarea de vîrf împărțită la $\sqrt{2}$, trebuie să fie egală cu valoarea tensiunii (TI) din tabelul 2.5. Încercarea trebuie să înceapă de la o tensiune egală cu cel mult o treime din valoarea tensiunii de încercare specificată, tensiunea fiind adusă la această valoare atît de repede cît permite măsurătoarea. Înainte de întreruperea încercării tensiunea trebuie redusă rapid la o valoare mai mică de o treime din tensiunea de încercare.

Durata aplicării tensiunii de încercare este de 60 de secunde pentru orice frecvență de încercare mai mică sau egală cu de două ori frecvența nominală. Dacă frecvența de încercare depășește dublul frecvenței nominale, durata încercării $t_{înc}$ trebuie să fie dată de relația

$$t_{înc} = 120 \times \frac{\text{frecvența nominală}}{\text{frecvența de încercare}} \quad [\text{s}], \tag{2.126}$$

dar nu mai mică de 15 secunde. Frecvența ridicată este necesară pentru a nu avea un curent de excitație prea mare în înfășurarea transformatorului, la tensiunea mult mărită față de regimul nominal.

Observație: Se știe că

$$U_1 \approx E_1 = \pi\sqrt{2} f w \Phi.$$

În cazul în care U_1 este foarte mare, ar trebui (la frecvența nominală) o valoare a fluxului maxim Φ tot foarte mare, ceea ce ar necesita o solenație (deci un curent de excitație) foarte mare. De aceea se preferă mărirea frecvenței f.

La încercarea transformatorului cu izolație neuniformă și cu $U_m \leq 245$ kV, tensiunile de încercare la care se supun capetele înfășurării (între fază și pămînt) sînt cele din tabelul 2.5. În cazul transformatoarelor monofazate, încercarea se execută, în mod normal, cu capătul neutru la pămînt (STAS 1703/3-80).

Încercarea izolației principale a transformatoarelor trifazate cu izolație gradată nu se poate executa prin alimentare trifazată deoarece, în acest caz, tensiunea de încercare dintre bornele înfășurării de I.T. va fi de $\sqrt{3}$ ori mai mare decît tensiunea față de părțile puse la pămînt (neutrul înfășurării de I.T. fiind legat la pămînt) [14].

Pentru un transformator trifazat, se execută trei încercări, cu o tensiune de încercare monofazată, legînd de fiecare dată, la pămînt, diferite borne ale înfășurării. Transformatoarele trifazate cu izolația înfășurării neuniforme, cu neutrul dimensionat să reziste la cel puțin o treime din tensiunea de încercare, se încearcă după schemele din figura 2.74. Cele două faze extreme A

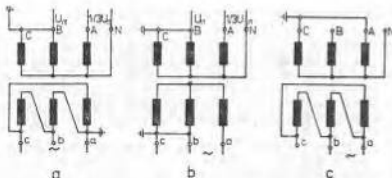


Figura 2.74. Schema pentru înc care cu tensiune sinusoidală indusă la 50 Hz a transformatoarelor cu izolație neuniformă : a, b — încercarea fazelor extreme ; c — încercarea fazei din mijloc.

și *C* se încearcă după una din schemele din figura 2.74, a și b, cînd fazele neîncercate se leagă împreună la pămînt, iar înfășurarea de joasă tensiune se alimentează direct între două borne de linie.

Prin alimentarea monofazată a înfășurării de joasă tensiune conectată în triunghi, fluxul și, respectiv, tensiunea indusă în faza încercată vor fi duble și în opoziție de fază față de cele din fazele neîncercate. Față de pămînt, pe borna fazei încercate se va aplica întreaga valoare a tensiunii nominalizate de încercare, iar la neutru o treime din aceasta. Faza *B* se încearcă după schema din figura 2.74, c.

La străpungerea netă a izolației de ulei și hîrtie sau a intervalului de ulei, în cazul încercării izolației principale cu tensiune indusă, de regulă, amorsează și eclatoarele de protecție (dacă sînt montate), conectate la neutrul transformatorului. La reanclanșarea sursei de tensiune înaltă, uneori tensiunea poate să fie ridicată aproape pînă la tensiunea de încercare, după care se produce o nouă descărcare sau o nouă amorsare a eclatorului de protecție. În unele cazuri însă, la reanclanșarea tensiunii și la creșterea tensiunii pînă la tensiunea de încercare nu se străpunge din nou izolația. Fenomenul se explică prin faptul că, după străpungerea intervalului disruptiv, produsele de descompunere a izolației sînt deplasate din canalul de arc, refăcîndu-se rigiditatea dielectrică a intervalului astfel încît să reziste la tensiunea de încercare. În acest caz, este necesar ca transformatorul respectiv să fie încercat obligatoriu la impuls de tensiune.

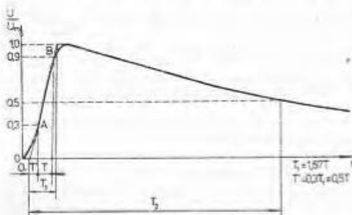
2.8.6. ÎNCERCAREA CU IMPULS DE TENSIUNE

Prin încercarea cu impuls de tensiune se verifică posibilitatea transformatorului de înaltă tensiune de a suporta solicitările datorite tensiunilor atmosferice. *Impulsul de tensiune de trăsnet*, este impulsul a cărui durată a frontului este cuprinsă între mai puțin de 1 μs și circa 10 μs (conform STAS 6669/2-77). *Impulsul de tensiune de trăsnet plin*, este unda de impuls care nu este întreruptă printr-o descărcare disruptivă.

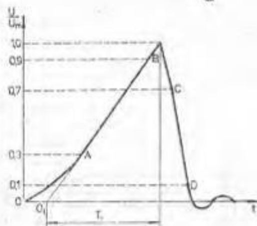
Impulsul de tensiune de trăsnet tăiat este unda de impuls plină care este întreruptă brusc printr-o descărcare disruptivă, provocînd o cădere bruscă a

tensiunii pînă la valoarea zero. Tăierea poate avea loc pe frontul, pe vîrful sau pe spatele undei și se execută cu un eclator exterior sau poate surveni în izolația interioară sau exterioară a obiectului încercat. Valoarea tensiunii de încercare este valoarea de vîrf, stabilită pentru un impuls de tensiune de trăsnet fără oscilații.

Durata convențională (T_1) a frontului impulsului de tensiune este durata egală cu 1,67 T, unde T este timpul în care tensiunea atinge valorile cuprinse între 30% și 90% din valoarea de vîrf (punctele A și B din figura 2.75 a). Originea convențională (O_1) a undei de impuls este momentul precedent duratei egală cu 0,3 T_1, corespunzătoare punctului A din figură.



a



b

Figura 2.75. Formele impulsurilor de tensiune de trăsnet: a — impulsul de tensiune de trăsnet plin; b — impulsul de tensiune de trăsnet tăiat.

Durata convențională (T_2) a semiamplitudinii undei de impuls este, conform STAS 6669/2-77, intervalul de timp cuprins între momentul care corespunde originii convenționale și momentul de pe spatele undei, în care tensiunea atinge valoarea de 50% din valoarea de vîrf. Tăierea undei de impuls este reducerea tensiunii pînă la valoarea zero sau aproape de zero, cu sau fără oscilații (fig. 2.75 b). Durata pînă la tăiere (T_c) este intervalul de timp cuprins între originea convențională a undei și momentul tăierii acesteia.

Durata convențională a tăierii tensiunii este durata egală cu 1,67 ori intervalul de timp cuprins între punctele C (corespunzînd la 70% U_m) și D (corespunzînd la 10% U_m).

Impulsul de tensiune de trăsnet normal, este impulsul de tensiune de trăsnet plin, avînd durata convențională a frontului de 1.2 μs și durata convențională a semiamplitudinii de 50 μs. Încercarea cu impuls de tensiune este mai complexă decît încercarea cu tensiune sinusoidală atît prin instalațiile de producere și măsurare, cît și prin metodica de încercare și interpretare a rezultatelor.

Așa cum se arată în schema de principiu (fig. 2.76), transformatorului de încercat 3, i se aplică o undă de impuls standard 1,2/50 μs, produsă de generatorul de impuls 1, sau o undă tăiată realizată cu ajutorul dispozitivului de tăiere a undei pline 2. Închiderea circuitului de impuls se realizează prin instalația de punere la pămînt 4 [14].

Generatorul de impuls de tensiune reprezintă un sistem de condensatoare care se încarcă în paralel într-un timp mai mult sau mai puțin îndelungat și apoi, la atingerea unei anumite tensiuni, se descarcă în serie prin intermediul unor eclatoare, într-un timp foarte scurt. Unda care trebuie produsă este, după STAS 1703/3-80, unda plină standardizată: 1, 2±30%/50±20% μs.

În figura 2.77 se dau schemele de principiu ale celor mai utilizate generatoare de impuls de tensiune. Durata semiamplitudinii undei de impuls este determinată de capacitatea echivalentă a condensatoarelor legate în serie (C) și de rezistența R_p, care, în unele cazuri, reprezintă și divizorul de tensiune.

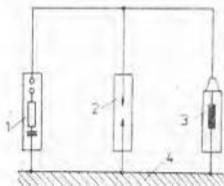


Figura 2.76. Schema de principiu pentru încercarea transformatoarelor la impuls de tensiune.

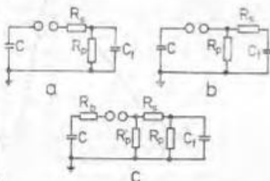


Figura 2.77. Schemele de principiu ale celor mai utilizate generatoare de impuls de tensiune (G.I.T.):
a — rezistența de front R_s în interiorul G.I.T.;
b — rezistența de front în exteriorul G.I.T.;
c — rezistența de front repartizată.

Durata minimă a frontului undei este determinată de capacitatea de sarcină C_r şi de rezistenţele serie R_s şi R_r. La funcţionarea în sarcină, capacitatea C_r include capacitatea obiectului de încercat şi capacitatea divizorului de tensiune.

La instalaţia de tăiere a undei de impuls, caracteristica cea mai importantă este constanta timpului de tăiere, prestabilit în limite largi de variaţie a tensiunii. Dispersia maximă a timpului de tăiere nu trebuie să depăşească $\pm 0,1$ μs pentru a fi posibilă defectoscopia izolaţiei pe baza oscilogramelor [14]. STAS 1703/3-80 recomandă să se folosească un eclator comandat cu timp reglabil, dar se admite şi folosirea unui eclator tijă-tijă. Circuitul de tăiere trebuie aranjat în aşa fel încît amplitudinea de polaritate inversă să fie sub 30% din amplitudinea impulsului tăiat. Impulsul de trăsnet normal trebuie să fie tăiat după 2...6 μs.

Pentru transformatoarele în ulei, tensiunea de încercare este în mod normal de polaritate negativă, întrucît se reduce astfel riscul descărcărilor aleatoare exterioare în circuitul de încercare. La efectuarea probei este necesar ca eclatoarele trecerilor izolate să fie scoase sau distanţa lor mărită, pentru a se evita amorsarea.

Înainte de aplicarea tensiunii de încercare la impuls, se indică o serie de oscilograme de comparaţie (*normograme*) la o tensiune redusă (50—70% din tensiunea la încercare). Încercarea se continuă cu trei impulsuri la tensiune plină. Secvenţa încercărilor la impuls se aplică succesiv fiecărei borne de linie a înfăşurării încercate. În cazul unui transformator trifazat celelalte borne de linie ale înfăşurării trebuie legate la pămînt direct sau printr-o impedanţă de valoare redusă, de exemplu un şunt pentru măsurarea curentului. Dacă înfăşurarea are neutrul scos pe capac sau la o cutie de borne, acesta trebuie de asemenea legat, la pămînt, direct sau printr-o impedanţă de valoare redusă. Se impune ca şi cuva să fie legată la pămînt.

În cazul cînd se prevede o încercare la impuls a bornei de nul a unei înfăşurări, se poate executa o încercare la impuls prin intermediul unei borne de linie oarecare sau al bornelor de linie legate împreună. Borna de nul este legată la pămînt printr-o impedanţă aleasă astfel încît amplitudinea tensiunii care apare la bornele acestei impedanţe, la aplicarea unui impuls pe bornele de linie, să fie egală cu tensiunea de încercare a capătului neutru (STAS 1703/3-80).

Amplitudinea impulsului aplicat pe borna de linie nu se prescrie, dar ea nu trebuie să depăşească 75% din valoarea tensiunii ei de încercare la impuls de trăsnet. Oscilogramele efectuate în timpul încercării trebuie să reprezinte clar forma tensiunii de impuls aplicate, precum şi o sursă suplimentară de observaţie, care să permită detectarea defectelor şi care, în majoritatea cazurilor, este oscilograma curentului prin neutrul înfăşurării încercate.

Încercarea cu impuls de tensiune cu undă tăiată se execută pe bornele de linie ale înfăşurării încercate şi se combină cu încercarea cu impuls de tensiune cu undă plină. Valoarea de vîrf a impulsului tăiat trebuie să fie egală cu cea a undei pline. Încercările se efectuează în următoarea ordine a impulsurilor:

— impuls cu undă plină la tensiune redusă;
— impuls cu undă plină la tensiune 100%;

— unul sau mai multe impulsuri cu undă tăiată la tensiune redusă ;
— două impulsuri cu undă tăiată la tensiune 100% ;
— două impulsuri cu undă plină la tensiune 100%.

Absența unor diferențe semnificative între normograme și oscilogramele tensiunilor și curenților corespunzători la tensiunea de 100% (*defectograme*) constituie confirmarea faptului că izolația a rezistat încercării.

2.8.7. MĂSURAREA PIERDERILOR ȘI A CURENTULUI DE FUNCȚIONARE ÎN GOL

Pierderile la funcționarea în gol (P_0) și curentul de funcționare în gol (I_0), trebuie măsurate la una din înfășurări, la frecvență nominală și la o tensiune egală cu cea nominală, dacă încercarea se face pe priza principală, sau egală cu tensiunea pe priza corespunzătoare, dacă încercarea se face pe altă priză. Celelalte înfășurări se lasă în gol. Fluxul în miezul magnetic al transformatorului are valoarea nominală și, în consecință, apar în miez atît pierderile datorate fenomenului de histerezis, cît și pierderile prin curenți turbionari. La acestea se adaugă și valoarea, practic neglijabilă, a pierderilor Joule, cauzate de curentul de funcționare în gol în înfășurarea alimentată. Toate aceste pierderi constituie pierderile la funcționarea în gol care, în esență, reprezintă pierderile în fier ce apar în regimul nominal de funcționare.

În cazul unităților trifazate de putere mare, prezintă dificultate atît realizarea unei surse cu un sistem simetric de tensiune, cît și măsurarea însăși a puterii active la un factor de putere mic (uneori sub 0,1) cu o precizie ridicată. Sistemul de tensiuni practic simetric este un sistem polifazat de tensiuni, la care componenta de secvență inversă nu depășește 5% din componenta de secvență directă [11].

La măsurarea curentului și a pierderilor la funcționarea în gol, se utilizează schemele principiale de montaj din figura 2.78, la transformatoarele monofazate, respectiv din figura 2.79, la transformatoarele trifazate. În cazul transformatoarelor trifazate se folosesc metode cu două sau trei wattmetre, în fiecare din scheme (directă sau indirectă).

În figura 2.79, d și e sînt reprezentate scheme cu trei wattmetre de construcție identică. Cu ajutorul rezistențelor adiționale ale wattmetrului se

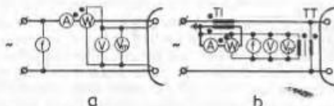


Figura 2.78. Schema principială de montaj pentru măsurarea pierderilor și a curentului de funcționare în gol la transformatoarele monofazate : a — conectarea directă a aparatelor ; b — conectarea aparatelor prin transformatoarele de curent (*TI*) și de tensiune (*TT*).

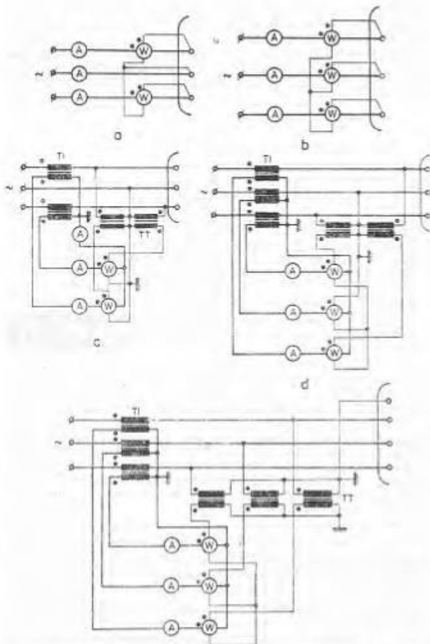


Figura 2.70. Schemă principială de montaj pentru măsurarea pierderilor și curenților de funcționare în gol la transformatoarele trifazate: a și c — cu două wattmetre; b, d și e — cu trei wattmetre.

formează un neutru artificial, astfel încît schemele să fie valabile pentru orice conexiune a transformatorului de măsură. Trebuie acordată o atenție deosebită respectării cu strictețe a polarității la conectarea în circuit a wattmetrelor și transformatoarelor de măsură.

În funcție de factorul de putere al transformatorului încercat, în schemele cu două wattmetre, unul dintre ele poate să indice cu semnul minus. Din acest motiv, pierderile măsurate se calculează din suma algebrică a indicațiilor cu relația:

$$P_{m2} = k_w(\alpha_1 \pm \alpha_2) \text{ [W]}, \tag{2.127}$$

în care:

k_w este constanta wattmetrelor;

α_1, α_2 — indicațiile celor două wattmetre.

La metoda celor trei wattmetre rezultatul măsurătorilor se obține din suma algebrică a indicațiilor celor trei wattmetre (α_1, α_2 și α_3)

$$P_{m3} = k_w(\alpha_1 \pm \alpha_2 \pm \alpha_3) \text{ [W]}. \tag{2.127 a}$$

Deoarece pierderile la funcționarea în gol variază aproximativ cu pătratul tensiunii, erorile de măsurare a tensiunii se reflectă în valoarea dublă a erorii de măsurare a pierderilor. Este deci, necesară folosirea voltmetrelor cu clasă de precizie cît mai bună (0,2), realizînd citiri în a doua jumătate a scalei sau chiar în ultima ei treime.

Încercarea la funcționarea în gol se execută ca probă individuală, cu transformatorul complet montat și umplut cu ulei. Se verifică în prealabil nivelul uleiului și se elimină aerul care eventual a rămas în anumite locuri, prin orificiile prevăzute, iar cuva se leagă la pămînt.

Prin această încercare, odată cu determinarea pierderilor P_0 și a curentului de funcționare în gol I_0, se verifică și capacitatea transformatorului de a funcționa sub tensiunea nominală, calitatea miezului, corectitudinea funcționării sistemului de reglaj sub tensiune și nivelul de zgomot al transformatorului. Valorile citite se trec în tabele (formulare tipărite), precizînd cu atenție constantele aparatelor pe treptele de măsură folosite. La transformatoarele cu trei coloane (cu flux forțat) curentul de funcționare în gol nu va fi egal pe cele trei faze, datorită asimetriei circuitului magnetic pe cele trei coloane. Asimetria în curenții de linie se manifestă, în mod deosebit, în funcție de conexiunea înfășurărilor alimentate.

De aceea, curentul de funcționare în gol al unui transformator trifazat se determină ca fiind media aritmetică a curenților măsurați pe cele trei faze. De obicei, valoarea acestuia se determină în procente din curentul nominal al înfășurării alimentate. Tensiunea de alimentare se consideră ca fiind media aritmetică a celor trei tensiuni de linie sau de fază măsurate.

Pierderile de funcționare în gol nu depind, practic, de temperatura miezului magnetic. Astfel, pierderile în gol, măsurate imediat după proba de încălzire, au fost mai mici cu circa 1% (abatere comparabilă cu dispersia erorii de măsură care apare la repetarea probelor în aceleași condiții și pe același transformator) decît cele măsurate cu transformatorul în stare practic rece. Dacă condițiile de încercare nu permit realizarea cu suficientă precizie a frecvenței nominale,

se admite măsurarea la o frecvență diferită de cea nominală cu cel mult $\pm 3\%$. Tensiunea aplicată la încercare trebuie să fie

$$U_a = \frac{U_N f}{f_N} \quad [V], \tag{2.128}$$

în care:

f este frecvența tensiunii aplicate;

U_N, f_N — valorile nominale ale tensiunii și frecvenței transformatorului.

Pierderile în gol calculate la 50 Hz sînt:

$$P_0 = \frac{P_0'}{p_2\left(\frac{f}{50}\right)^2 + p_1\left(\frac{f}{50}\right)} \quad [W], \tag{2.129}$$

unde:

P_0' — pierderile măsurate la frecvența f și la tensiunea U_a;

p_1 — partea din pierderile în fier care reprezintă pierderile prin histerezis, egală cu 0,5 pentru tablă cu cristale orientate și 0,7 pentru tabla cu cristale neorientate;

p_2 — partea din pierderile în fier care reprezintă pierderile prin curenți turbionari, egală cu 0,5 la tabla cu cristale orientate și 0,3 pentru tabla cu cristale neorientate.

Încercarea de funcționare în gol, la tensiuni diferite de tensiunea nominală se va efectua, ca încercare specială, în următoarele condiții:

a) pentru mai multe tensiuni (de exemplu 0,9 U_N; U_N și 1,1 U_N);

b) la tensiune redusă (380 V).

2.8.8. VERIFICAREA PIERDERILOR ȘI A TENSIUNII DE FUNCȚIONARE ÎN SCURTCIRCUIT

Tensiunea nominală de scurtcircuit care, de obicei, se exprimă în procente din tensiunea nominală, este tensiunea care se aplică pe priza nominală a uneia din înfășurări, la temperatura convențională, cealaltă înfășurare fiind în scurtcircuit, astfel încît curentul în înfășurarea alimentată să aibă valoarea sa nominală. Temperatura convențională (de calcul) t_N a înfășurărilor se consideră de 75°C cînd materialele izolante sînt în clasa *A*, *E* și *B* și de 115°C la clasele de izolație *F*, *H* și *C* (conform STAS 1703/7-80). Această regulă nu se aplică la transformatoarele speciale.

Pierderile nominale datorate sarcinii, la transformatorul cu două înfășurări, se consideră pierderile care rezultă în condițiile măsurării tensiunii nominale de scurtcircuit. Dacă se măsoară tensiunea primară de linie U_k, la frecvența nominală și la diferiți curenți de linie I_k ai înfășurării primare, se obține caracteristica de scurtcircuit $U_k = f(I_k)$, care la temperatura constantă a înfășurărilor este foarte apropiată de o dreaptă.

Puterea activă absorbită pe partea de alimentare la încercarea de scurtcircuit, este practic egală cu suma dintre pierderile Joule în înfășurări (calculate cu rezistența măsurată în curent continuu) și pierderile suplimentare din

piesele masive de consolidare, situate în zona cîmpului de scăpări, pierderile în fier fiind neglijabile în raport cu pierderile Joule, ele corespunzînd unei inducții foarte mici în miez, deoarece $U_k \ll U_N$.

Măsurările trebuie efectuate rapid, iar intervalele de timp dintre măsurări trebuie să fie și ele destul de mari pentru ca încălzirile să nu introducă erori semnificative. Pentru a se evita instabilitatea tensiunii de alimentare, încercările se execută cu un grup motor-generator, și nu de la rețeaua de alimentare. Transformatorul auxiliar trebuie astfel ales, încît mașina să funcționeze într-un punct cît mai stabil.

Măsurarea poate fi efectuată cu un curent oarecare, cuprins între 25% și 100%, dar preferabil de minim 50% din curentul nominal (pe priza principală) sau din curentul de priză. În acest caz, pierderile de scurtcircuit și tensiunea de scurtcircuit, care corespund curentului nominal al înfășurării, se calculează astfel:

$$P_k = P_{km}\left(\frac{I_N}{I_m}\right)^2 \text{ [W]}, \qquad (2.130)$$

respectiv

$$U_k = U_{km}\frac{I_N}{I_m} \text{ [V]} \qquad (2.131)$$

unde:

I_N este valoarea nominală a curentului înfășurării căreia i se aplică tensiunea;

I_m — curentul la care se execută încercarea;

P_{km}, U_{km} — pierderile, respectiv tensiunea de scurtcircuit (în V), măsurate la încercare.

Pierderile măsurate la încercarea de scurtcircuit și recalculate la curentul nominal, se raportează apoi la temperatura de calcul (convențională) t_N, corespunzătoare clasei de izolație a înfășurării, temperatură la care se calculează de regulă aceste pierderi (v. relațiile (3.38) și (3.41, b)).

Astfel, dacă temperatura la care se face măsurarea pierderilor în scurtcircuit t_m, pentru care au rezultat pierderile P_{ktm}, este diferită de cea nominală (convențională) t_N, atunci raportarea se face cu relația

$$P_{ktN} = P_{ktm}\frac{t_N + 235}{t_m + 235} \text{ [W]}. \qquad (2.132)$$

Măsurătorile efectuate permit și separarea pierderilor suplimentare în înfășurări de cele principale.

Astfel, dacă pierderile principale (prin efect Joule) pentru rezistențele înfășurărilor măsurate în curent continuu, se determină pentru curenții nominali, cu relația

$$P_{JtN} = m_1 R_{1tN} I_{1N}^2 + m_2 R_{2tN} I_{2N}^2 \text{ [W]} \qquad (2.133)$$

unde, rezistențele măsurate pentru primar (1) sau secundar (2), sînt date de relația (2.121), atunci pierderile electrice suplimentare rezultă cu relația

$$P_{ws} = P_{ktN} - P_{JtN} \text{ [W]}. \qquad (2.134)$$

Valoarea pierderilor în scurtcircuit obținută cu relația (2.132) se compară cu pierderile electrice totale, calculate (v. relația (3.41 b)), cele două valori trebuind să fie aproximativ egale, abaterea limită dintre ele fiind indicată în tabelul 2.2.

Observație. Dacă pierderile prin efect Joule se determină direct cu rezistențele măsurate la temperatura t_m, atunci se face raportarea acestora la temperatura convențională t_N cu relația

$$P_{JtN} = P_{Jtm} \frac{t_N + 235}{t_m + 235} \quad [\text{W}] \tag{2.135}$$

Tensiunea de scurtcircuit, în procente din tensiunea nominală este (pentru U_k, dată de relația (2.131))

$$u_k = \frac{U_k}{U_N} 100 \quad [\%]. \tag{2.136}$$

Componentele activă u_{ka} și reactivă u_{kr}, ale tensiunii de scurtcircuit măsurată la temperatura t_m și recalculată cu relația (2.131), în procente sînt:

— componenta activă (v. și relația (3.48)):

$$u_{ka} = \frac{P_{ktm}}{S_N} 100 \quad [\%], \tag{2.137}$$

unde S_N, este puterea nominală a transformatorului, în VA;

— componenta reactivă (v. și relația 3.50)) e:

$$u_{kr} = \sqrt{u_k^2 - u_{ka}^2} \quad [\%]. \tag{2.137 a}$$

Recalcularea tensiunii nominale de scurtcircuit măsurată la temperatura t_m, la temperatura convențională t_N se face cu relația

$$u_{ktN} = \sqrt{\left(u_{ka} \frac{t_N + 235}{t_m + 235}\right)^2 + u_{kr}} \quad [\%]. \tag{2.138}$$

Dacă frecvența f din timpul încercării, diferă de frecvența nominală f_N cu mai mult de $\pm 3\%$ atunci, se procedează la recalcularea tensiunii de scurtcircuit la frecvența nominală cu relația

$$u_{ktN(fN)} = \sqrt{\left(u_{ka} \frac{t_N + 235}{t_m + 235}\right)^2 + \left(u_{kr} \frac{f_N}{f}\right)^2} \quad [\%]. \tag{2.139}$$

Această valoare se compară cu cea din fișa tehnică (dată de relația (3.50 c)), abaterea limită dintre ele fiind indicată în tabelul 2.2.

2.8.9. ÎNCERCAREA LA ÎNCĂLZIRE

Sub acțiunea căldurii apar sau se accelerează procese chimice și se degradează proprietățile fizice ale materialelor electroizolante, altfel spus *izolația îmbătrînește termic*. De pildă, în cazul transformatoarelor cu ulei ale căror înfășurări sînt izolate cu hîrtie, o depășire permanentă a încălzirii admise

cu numai 8—10°C reduce durata de viață a transformatorului cu aproximativ 50%. De aceea, încălzirile diferitelor părți ale transformatorului sînt strict limitate. Pentru transformatoarele în ulei izolate cu hîrtie, la temperatura mediului ambiant de 40°C, se admit supratemperaturile din tabelul 2.6, iar supratemperaturile pentru transformatoarele uscate sînt date în tabelul 2.7.

TABELUL 2.6

Limitele de încălzire pentru transformatoarele în ulei (Extras din STAS 1703/2-59).

Partea transformatorului în ulei	Metoda de măsurare a încălzirii	Limita maximă de încălzire
Înfășurări avînd clasa de temperatură a izolației *A*	Metoda variației rezistenței	65°C, pentru circulația agentului de răcire naturală sau forțată nedirijată; 70°C, pentru circulația agentului de răcire forțată și dirijată
Uleiul în partea superioară	Cu termometrul	60°C, pentru transformatoare dotate cu conservator sau etanșe la aer; 55°C, pentru transformatoare care nu sînt dotate cu conservator sau nu sînt etanșe la aer
Circuitele magnetice, părțile metalice și alte materiale adiacente	Cu termometre, termocupluri etc.	Temperatura trebuie să nu atingă în nici un caz o valoare susceptibilă să dăuneze circuitului magnetic sau altor părți sau materiale adiacente

TABELUL 2.7

Limitele de încălzire pentru transformatoarele uscate (Extras din STAS 1703/2-59).

Partea transformatorului uscat	Modul de răcire	Clasa de temperatură a izolației*	Metoda de măsurare a încălzirii	Limita maximă de încălzire °C
Înfășurări	Cu aer, natural sau cu ventilație forțată	*A* *E* *B* *F* *H*	Metoda variației rezistenței	60 75 80 100 125 150**
Circuite magnetice și alte părți: *a)* în contact cu înfășurările *b)* nefiind în contact cu înfășurările	Toate		Cu termometre, termocupluri etc.	*a)* aceleași valori ca pentru înfășurări *b)* temperatura trebuie să nu atingă în nici un caz o valoare susceptibilă să dăuneze circuitului magnetic sau altor părți sau materiale adiacente

* Clasificarea pe clase de temperaturi conform STAS 6247-60.

** Pentru anumite materiale electroizolante, pe baza acordului între producător și beneficiar, se pot accepta încălziri mai mari de 150°C.

Dintre metodele industriale de încercare a transformatorului la încălzire, cea mai folosită este metoda încercării în scurtcircuit. În cazul acestei metode, una din înfășurările transformatorului (de obicei cea de înaltă tensiune) este alimentată, iar cealaltă scurtcircuitată. Dacă tensiunea de alimentare este egală cu tensiunea de scurtcircuit, în ambele înfășurări se obțin curenții nominali. Crescînd tensiunea de alimentare se măresc curenții astfel încît în transformator să apară pierderile totale, egale cu suma pierderilor în gol și a pierderilor de scurtcircuit recalculate la temperatura convențională t_N.

Încercarea se execută în două etape. În prima etapă, corespunzătoare timpului T_1 (fig. 2.80) se alimentează transformatorul în scurtcircuit la un curent mărit (I_1) față de curentul nominal (I_N) astfel încît wattmetrele să indice pierderile totale

$$P_T = P_0 + P_{kIN} \text{ [W]}. \tag{2.140}$$

Valoarea curentului de scurtcircuit măsurată, trebuie să corespundă aproximativ cu valoarea calculată din relația

$$I'_K = I_N \sqrt{\frac{P_0 + P_{kIN}}{P_{kIN}}} \text{ [A]}. \tag{2.141}$$

Încercarea la încălzire a transformatorului în ulei cuprinde determinarea încălzirii uleiului în partea superioară și determinarea încălzirii fiecărei înfășurări. Temperatura uleiului în partea superioară trebuie măsurată cu ajutorul unui termometru, așezat într-un lăcaș umplut cu ulei și aflat pe capac sau pe racordurile de admisie în răcitor. Încercarea se continuă pînă la stabilizarea temperaturii în straturile superioare ale uleiului, măsurîndu-se încălzirea uleiului în straturile superioare (adică supratemperatura) peste temperatura mediului ambiant.

Dacă nu se poate realiza valoarea exactă a pierderilor totale, încercarea poate fi efectuată pentru o valoare diferită a pierderilor cît mai apropiată posibil de valoarea totală menționată, însă în nici un caz mai mică de 80% din aceasta ; în acest caz trebuie să se aplice valorii determinate pentru încălzirea uleiului în partea superioară, un factor de corecție

$$k_1 = \left(\frac{P_T}{P_R}\right)^x \tag{2.142}$$

unde :

P_R reprezintă pierderile reale în cursul încercării ;

x — ia valorile : 0,8 pentru ventilație naturală și 1 pentru ventilație forțată și răcirea cu apă.

Se trece apoi la a doua etapă (fig. 2.80), care constă în reducerea tensiunii de alimentare la o valoare care să permită obținerea curenților nominali în înfășurări, la frecvența nominală, această valoare fiind menținută un timp $T_2 \approx 1$ oră, după care se determină temperatura înfășurărilor prin metoda variației rezistenței. La calculul încălzirii înfășurărilor peste temperatura medie a uleiului trebuie să se țină seama de scăderea temperaturii medii a uleiului în timpul acestei ore.

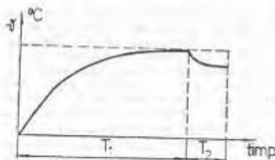


Figura 2.80. Curba de variație a încălzirii ϑ a unui transformator la încărcare nominală: T_1 — perioada încărcării la pierderi totale $P_T = P_0 + P_{sN}$; T_2 — perioada încărcării la I_N sau P_{sN}.

Încălzirea fiecărei înfășurări se determină scăzînd din temperatura medie a înfășurării temperatura agentului de răcire exterior în cursul încercării, curenții în înfășurări fiind cei nominali, la frecvența nominală. Potrivit STAS 1703/2-80, dacă nu se pot realiza exact valorile curenților, încercările se pot face la un curent mai mare sau egal cu 90% din valoarea curentului nominal, caz în care trebuie să se aplice încălzirii înfășurărilor, peste temperatura medie a uleiului, un factor de corecție

$$k_2 = \left(\frac{I_N}{I_E}\right)^y, \qquad (2.143)$$

unde

I_E — este curentul din timpul încercării;

y — are valoarea de 1,6 pentru circulația naturală și nedirijată a uleiului și 2 pentru circulația forțată și dirijată a uleiului.

Măsurarea rezistenței se face prin metoda punții sau prin metoda voltmetru-ampermetru în curent continuu, imediat după întreruperea alimentării.

Problema principală care trebuie rezolvată în continuare este extrapolarea curbei de variație a rezistențelor obținute la măsurări, pentru a obține valoarea rezistenței la cald în momentul întreruperii curentului de sarcină. În cazul metodei extrapolării, folosind scări liniare, se procedează astfel: se efectuează o serie de determinări ale rezistenței la intervale egale de timp și se trasează curba 1 a rezistenței în funcție de timp (fig. 2.81), care se prelungește pînă în momentul întreruperii alimentării (timp = 0). Scările de rezistență (ΔR_x), corespunzătoare la intervale de timp egale sînt rabătute pe axa ordonatelor, dînd dreapta L. R_2 este rezistența înfășurării în momentul întreruperii alimentării, care rezultă la intersecția dreptei 2 dusă sub unghiul α față de L, cu axa ordonatelor. (unghiul α se determină cu segmentele ΔR_i)

Temperatura unei înfășurări la sfîrșitul încercării se calculează cu ajutorul relațiilor:

$$t_2 = \frac{R_2}{R_1}(235 + t_1) - 235\ [°C], \text{ pentru cupru}; \qquad (2.144)$$

$$t_2 = \frac{R_2}{R_1}(225 + t_1) - 225\ [°C], \text{ pentru aluminiu}, \qquad (2.145)$$

în care:

R_2 — este rezistența înfășurării în stare caldă la temperatura t_2, în Ω;

R_1 — rezistența înfășurării în stare practic rece, în Ω;

t_1 — temperatura înfășurării, în °C, la care se determină R_1.

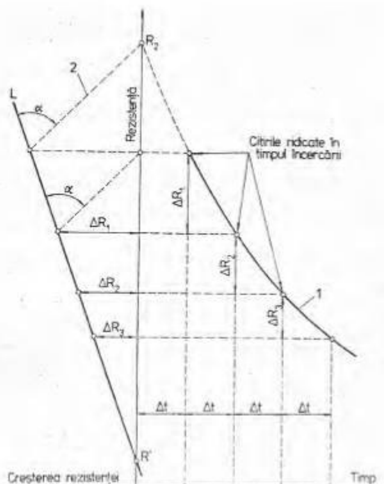


Figura 2.81. Diagramă pentru determinarea rezistenței înfășurărilor în momentul întreruperii alimentării și pentru determinarea temperaturii medii a uleiului.

Pentru determinarea încălzirii medii a uleiului, metoda preferată se bazează pe măsurarea directă, cu termometrele, a diferenței de temperatură ($\Delta\vartheta$) între partea superioară și inferioară a elementului de răcire. În baza acestei diferențe de temperatură, măsurată, valoarea încălzirii medii a uleiului (ϑ_{umed}) se calculează cu relația:

$$\vartheta_{umed} = \vartheta_u - \frac{\Delta\vartheta}{2}\ [^\circ C], \qquad (2.146)$$

în care ϑ_u este încălzirea uleiului în straturile superioare.

Încercarea la încălzire a transformatoarelor uscate se face cu circuitul magnetic excitat la inducția magnetică obișnuită. Proba se poate executa la

tensiune nominală şi la un curent de sarcină I_m redus, dar nu mai mic de 90%, din valoarea curentului nominal I_N. În acest caz, încălzirea medie măsurată a înfăşurărilor ϑ_m se poate recalcula la condiţiile nominale ϑ_{inf} cu relaţia

$$\vartheta_{inf} = \vartheta_m \left(\frac{I_N}{I_m}\right)^q \ [°C], \tag{2.147}$$

în care $q = 1,6$ la răcire naturală (*AN*) şi $q = 1,8$ la răcirea forţată (*AF*).

2.8.10. ÎNCERCAREA LA SCURTCIRCUIT BRUSC

Verificarea stabilităţii la scurtcircuit brusc se execută ca încercare de tip şi specială, pentru transformatoare pînă la 40 MVA inclusiv şi ca verificare specială, peste 40 MVA. Se consideră că un transformator rezistă la scurtcircuitul brusc, dacă după încercare, sînt îndeplinite următoarele două condiţii:

— temperatura înfăşurării atinsă la scurtcircuite prelungite să nu depăşească limita admisibilă pentru clasa de izolaţie respectivă şi menţionată în norme;

— înfăşurările şi sistemul lor de consolidare, inclusiv conexiunile şi comutatorul de prize, să nu se deterioreze sau să se deformeze sub acţiunea forţelor electrodinamice radiale şi axiale.

Încercarea stabilităţii termice şi dinamice la scurtcircuit brusc, are un caracter distructiv atunci cînd transformatorul nu corespunde cerinţelor impuse. Pe lîngă şocul de forţă maxim creat de valoarea de şoc a curentului de scurtcircuit din primul moment, vibraţia înfăşurărilor sub acţiunea unui scurtcircuit prelungit şi efectul cumulativ al mai multor scurtcircuite joacă rol hotărîtor în comportarea transformatorului. În mod deosebit la înfăşurările cilindrice stratificate, sub acţiunea forţelor de scurtcircuit, principalul pericol îl constituie alunecarea conductoarelor alăturate din acelaşi strat, suprapunerea şi ruperea lor, însoţită de strivirea izolaţiei şi apariţia unor defecte electrice (scurtcircuite locale în extindere). Un mic defect iniţial se amplifică şi duce la forţe din ce în ce mai mari, respectiv la solicitări ce nu mai pot fi stăpînite [11].

Transformatoarele trifazate sau grupurile transformatorice trifazate se împart în trei categorii, în funcţie de puterea nominală:
— categoria I: pînă la 3 150 kVA inclusiv;
— categoria a II-a: peste 3 150 kVA, pînă la 40 MVA inclusiv;
— categoria a III-a: peste 40 MVA.

Avînd în vedere complexitatea solicitărilor care apar la scurtcircuitare, verificarea stabilităţii dinamice trebuie corelată cu cea a stabilităţii termice.

Stabilitatea termică la scurtcircuit reprezintă capacitatea transformatorului de a suporta o anumită valoare eficace a curentului de scurtcircuit un anumit timp (curent limită termic), fără a depăşi valorile admisibile (în acest caz) ale temperaturii.

Pentru transformatoare, conform STAS 1703/5-80, dacă nu se specifică altfel în documentele tehnice normative, timpul pentru curentul limită termic, se consideră de 2 s, iar temperaturile admise nu trebuie să depăşească

valorile indicate în tabelul 3 din același STAS (de exemplu pentru transformatoarele în ulei, temperaturile maxime admise sînt de 250°C — pentru cupru și 200°C — pentru aluminiu). Valoarea eficace a curentului de scurtcircuit se va calcula ținînd seama de impedanța de scurtcircuit a transformatorului și de impedanța rețelei atît pentru transformatoarele din categoria a II-a și a III-a, cît și pentru transformatoarele din categoria I, dacă impedanța rețelei este mai mare decît 5% din impedanța de scurtcircuit a transformatorului (STAS 1703/5-80). În cazul în care la transformatoarele din categoria I-a impedanța rețelei este mai mică de 5% din impedanța de scurtcircuit a transformatorului atunci impedanța rețelei se neglijează [12].

Pentru transformatoarele trifazate valoarea eficace a curentului de scurtcircuit simetric (I) se calculează cu relația:

$$I = \frac{U}{(Z_k + Z_r)\sqrt{3}} \text{ [kA]}, \tag{2.148}$$

în care:

Z_r — este impedanța de scurtcircuit a rețelei

$$Z_r = \frac{U_r^2}{S} \text{ [}\Omega\text{/fază)];} \tag{2.149}$$

U_r — tensiunea nominală a rețelei, în kV;

S — puterea aparentă de scurtcircuit a rețelei în MVA. Dacă nivelul puterii de scurtcircuit nu este specificat, se vor folosi datele din tabelul 2.8;

TABELUL 2.8

Puterea aparentă de scurtcircuit a rețelei (Extras din STAS 1703/5-80).

Tensiunea cea mai ridicată a înfășurării U_m [kV]	Puterea aparentă de scurtcircuit a rețelei [MVA]
3,6 ; 7,2 ; 12	500
17,5 ; 24 ; 30	1 000
42	1 500
72,5	3 000
123	6 000
245	20 000
420	40 000

U și Z_k — au următoarele semnificații:

a) pentru *priza principală*:

U — tensiunea nominală U_N a înfășurării considerate, în kV;

Z_k — impedanța de scurtcircuit a transformatorului, raportată la înfășurarea considerată, care se calculează cu relația

$$Z_k = \frac{u_k U_N^2}{100\, S_N} \text{ [}\Omega\text{/fază]}, \tag{2.150}$$

în care:

u_k este tensiunea de scurtcircuit la curentul nominal şi pentru temperatura de referinţă, în procente din tensiunea nominală, dată de relaţia (2.139);

S_N — puterea nominală a transformatorului, în MVA;

b) pentru *alte prize* decît cea principală:

U — tensiunea pe priză la înfăşurarea şi la priza considerată, în kV;

Z_t — impedanţa de scurtcircuit a transformatorului, raportată la înfăşurarea şi la priza considerată în Ω/fază.

Stabilitatea electrodinamică la scurtcircuit reprezintă capacitatea transformatorului de a rezista acţiunii mecanice a amplitudinii celui mai mare curent de scurtcircuit (curent limită dinamic), fără să producă deteriorări sau deformaţii permanente ori să împiedice buna sa funcţionare. În general, transformatoarele din categoria a III-a nu pot fi încercate conform STAS 1703/5-80. În acest caz, stabilitatea dinamică la scurtcircuit va fi verificată prin calcule.

Înainte de începerea încercărilor de scurtcircuit, transformatorul este supus încercărilor individuale expuse anterior.

Valoarea de vîrf a curentului de încercare pentru transformatorul cu două înfăşurări (valoarea de şoc), depinde atît de raportul dintre reactanţa şi rezistenţa înfăşurărilor (X/R), cît şi de momentul declanşării scurtcircuitului, care se reglează cu un aparat de anclanşare sincronă. Pentru a se obţine o asimetrie maximă a curentului într-una din înfăşurările de fază, anclanşarea trebuie să se producă în momentul trecerii prin zero a tensiunii aplicate acestei înfăşurări. Amplitudinea primului vîrf al curentului asimetric de încercare se calculează cu relaţia

$$i_s = k\sqrt{2}\ I_k\ [\text{A}], \qquad (2.151)$$

în care:

I_k este curentul de scurtcircuit, care se determină cu relaţia

$$I_k = \frac{100}{u_k'} I_N\ [\text{A}], \qquad (2.152)$$

unde:

I_N este valoarea curentului nominal;

u_k' — tensiunea de scurtcircuit, în procente, dată de relaţia

$$u_k' = u_k \frac{P_t + P_r}{P_r}\ [\%], \qquad (2.153)$$

cu:

u_k — tensiunea de scurtcircuit determinată experimental la încercarea de scurtcircuit şi recalculată cu relaţia (2.139), în procente;

P_t şi P_r — puterea de scurtcircuit a transformatorului şi a reţelei;

$k = 1 + e^{-\frac{R}{X}}$, cu menţiunea că:

$X = X_t + X_r$ este suma reactanţelor transformatorului şi reţelei, în Ω;

$R = R_t + R_r$, este suma rezistenţelor transformatorului şi reţelei, în Ω.

Încercarea transformatorului numai la scurtcircuit cu durată redusă (0,1—0,2 s) nu reproduce situaţiile de exploatare şi starea de vibraţie prelun-

gită a bobinelor. În același timp, însă, realizarea de scurtcircuite cu durată prelungită cu generatoare sincrone de șoc, aflate în dotarea laboratoarelor de putere, reprezintă principala dificultate. Soluția cea mai bună a fost, în aceste condiții, mărirea numărului de scurtcircuite cu durată redusă, justificată de efectul cumulativ al mai multor scurtcircuite la care transformatorul poate fi supus în exploatare.

Astfel, pentru transformatoarele trifazate din categoria I-a, se execută conform STAS 1703/5-80, nouă încercări, cîte trei pe fiecare coloană, durata fiecărei încercări fiind de 0,5 s cu o abatere limită de $\pm 10\%$. Dacă nu se specifică altfel într-un document tehnic normativ, încercările pe fiecare coloană pentru transformatorul cu prize se fac pe poziții diferite ale comutatorului de prize : trei încercări pe poziția corespunzătoare celui mai mare raport de transformare pe una din coloanele exterioare, trei încercări pe priza principală pe coloana din mijloc și trei încercări pe poziția corespunzătoare celui mai mic raport de transformare pe cealaltă coloană exterioară.

Pentru transformatoarele din categoria a II-a, se execută șase scurtcircuite, dintre care trei cu comutatorul de prize pe poziția corespunzătoare celui mai mic raport de transformare, iar trei cu comutatroul de prize pe poziția corespunzătoare celui mai mare raport de transformare.

Pentru transformatoarele din categoria a III-a producătorul și beneficiarul trebuie să stabilească, printr-un document tehnic normativ, numărul de încercări, durata lor și pozițiile comutatorului de prize.

Încercarea de scurtcircuit brusc se poate executa fie prin scurtcircuitarea inițială a unei înfășurări și alimentarea ulterioară a celeilalte (fig. 2.82, a), fie prin alimentarea inițială a unei înfășurări și scurtcircuitarea ulterioară a celei'lalte (fig. 2.82, a). La folosirea schemei din figura 2.82, a, se obțin solicitări acoperitoare comparativ cu valorile obținute folosind schema din figura 2.82, b, ca urmare a faptului că, la alimentarea transformatorului scurtcircuitat inițial, pe lîngă curentul de scurtcircuit, apare în înfășurarea alimentată și șocul de curent de magnetizare.

În timpul fiecărei încercări (inclusiv încercările preliminare), la oscilograf trebuie să se înregistreze următoarele :

— tensiunea aplicată (între bornele de linie) ;

— curenții de scurtcircuit în înfășurarea încercată și, eventual cel din înfășurarea alimentată.

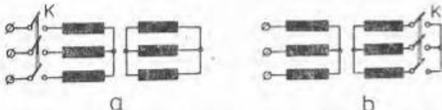


Figura 2.82. Scheme de încercare la scurtcircuit brusc : a — scurtcircuitarea inițială a unei înfășurări și alimentarea ulterioară a celeilalte ; b — alimentarea inițială a unei înfășurări și apoi scurtcircuitarea celeilalte.

La transformatoarele din categoria I, după încercarea de scurtcircuit, se repetă toate încercările individuale, încercările dielectrice executîndu-se la 75% din tensiunea de încercare inițială.

Se decuvează apoi transformatorul pentru inspectarea părții active și detectarea defectelor vizibile (schimbări de poziție a conexiunilor, deplasări, urme de amorsare etc.) care ar putea pune în pericol funcționarea transformatorului, chiar dacă la încercările individuale a corespuns.

Se consideră, potrivit STAS 1703/5-80, că transformatorul a corespuns la încercările de scurtcircuit dacă:

a) a corespuns încercărilor individuale repetate;

b) la măsurările efectuate în timpul încercărilor de scurtcircuit și la examinarea după decuvare nu se observă nici un defect;

c) reactanța de scurtcircuit măsurată după încercări nu diferă de cea măsurată inițial cu mai mult de:

— 2% pentru transformatoarele cu înfășurări concentrice circulare, pentru transformatoarele cu înfășurarea de joasă tensiune în bandă putîndu-se adopta o limită de 4% cînd $u_r \geq 3\%$;

— 7,5% pentru transformatoarele cu înfășurări concentrice necirculare cu tensiunea de scurtcircuit de cel puțin 3%.

2.8.11. VERIFICAREA CUVEI LA SUPRAPRESIUNE

Cuvele transformatorului sînt supuse, datorită presiunii interioare care apare în regim normal de exploatare, la solicitări mai mari (50—60 kPa), ca urmare a exploziilor interne cauzate de defecte inerente regimurilor de avarie. Cuva preia, de asemenea și forțele de inerție ce tind să deplaseze partea decuvabilă în raport cu ea în timpul transportului, prin cîrligele de ridicare trebuind să suporte întreaga greutate a transformatorului.

Verificarea rezistenței mecanice a cuvei, se face cu o coloană de ulei cu presiune de azot, introdus sub capacul transformatorului, racordîndu-se ermetic furtunul pompei la conservator sau la unul din racordurile cuvei și montîndu-se un aparat pentru verificarea presiunii. Suprapresiunile normate pentru proba cuvei sînt (după STAS 1703/7-80):

— 49 kPa (0,5 daN/cm²) la transformatoarele cu puteri pînă la 6,3 MVA, inclusiv;

— 59 kPa (0,6 daN/cm²) la transformatoarele cu puteri între 6,3 MVA și 63 MVA, inclusiv.

Rezistența mecanică a cuvelor transformatoarelor peste 63 MVA, dimensionate pentru vid, se verifică prin realizarea unui vid de 2,6 kPa (20 tori) fie în cuva goală, fie în cuva în care s-a montat partea activă a transformatorului. După stabilizarea valorilor indicate mai sus, cordoanele de sudură nu trebuie să prezinte fisuri; în caz contrar, acestea vor fi remediate și încercarea se va repeta. După anularea suprapresiunii sau vidului se admit deformări permanente ale pereților cuvei în limitele prescrise de furnizor.

Măsurarea eventualelor deformații ale cuvei (în punctele susceptibile la deformări) se face cu ajutorul comparatorului de lungimi. Pentru a determina punctele în care se face măsurarea, se pornește de la observația că traversele

de rigidizare împart pereţii cuvei în mai multe suprafeţe de formă dreptunghiulară, punctele susceptibile de a prezenta deformări găsindu-se la intersecţia diagonalelor acestor dreptunghiuri.

Verificarea etanşeităţii cuvei la ulei, se face la fiecare transformator montat pentru funcţionare, observînd cu ochiul liber dacă există scurgeri de ulei la aplicarea suprapresiunii timp de:

— 4 ore pentru transformatorul cu puterea pînă la 3 500 kVA;

— 8 ore pentru transformatorul cu puterea peste 3 500 kVA, şi dacă nivelul presiunii, stabilit iniţial, nu a scăzut.

În cazul verificării etanşeităţii la ulei a transformatorului, se va verifica să nu apară scurgeri de ulei pe la garnituri, robinete, vane, suduri etc.

12.8.12. MĂSURAREA RIGIDITĂŢII DIELECTRICE ŞI A UNGHIULUI DE PIERDERI DIELECTRICE ALE ULEIULUI DE TRANSFORMATOR

Nivelul de izolaţie al unui transformator este strîns legat atît de calitatea materialelor izolante folosite, cît şi de calitatea uleiului izolant din transformator. În exploatare este foarte important să se cunoască provenienţa uleiului de transformator atît în cazul înlocuirii lui, cît şi mai ales, în cazul completării transformatorului cu ulei. Sînt cazuri cînd, amestecînd uleiuri de origini diferite, calităţile uleiului obţinut prin amestec sînt mult înrăutăţite şi durata de serviciu este redusă simţitor.

Uleiul neaditivat pentru transformatoare şi întreruptoare electrice, fabricat la Rafinăria Ploieşti se obţine din fracţiuni de ulei selecţionat şi este simbolizat cu iniţialele *TR* 30.

În timpul exploatării, uleiul de transformator îmbătrîneşte, pierzîndu-şi, în raport de condiţiile de lucru, calităţile dielectrice şi unele proprietăţi fizico-chimice (vezi paragraful 5.2.3). Un factor care reduce calităţile uleiului în decursul exploatării îl formează contactul dintre ulei şi aerul din atmosferă (care conţine oxigen şi umiditate).

Caracteristicile electrice ale uleiului sînt influenţate de conţinutul de apă, care se poate găsi sub două forme în ulei: sub formă de apă liberă (emulsie sau suspensie) şi sub formă de soluţie (apă de compoziţie) sau absorbită chimic, existînd între cele două elemente (vezi [11]) legături de ordin electrostatic. S-a constatat că apa conţinută sub formă de soluţie nu are o influenţă sensibilă asupra rigidităţii dielectrice, în schimb apa liberă conţinută în ulei provoacă o scădere simţitoare a proprietăţilor dielectrice [15].

Încercările şi verificările la care este supus uleiul de transformator sînt indicate în tabelul 5.1. În cele ce urmează, se vor expune principalele verificări electrice la care este supus uleiul de transformator şi anume: măsurarea rigidităţii dielectrice (a tensiunii de străpungere) şi măsurarea pierderilor dielectrice.

Determinarea rigidităţii dielectrice sau a tensiunii de străpungere este un criteriu de apreciere a purităţii uleiului. Dintre impurităţi, apa este aceea care are efectele cele mai dăunătoare asupra rigidităţii dielectrice.

După literatura de specialitate, un conținut de apă pînă la 25 grame/tonă la temperatura mediului ambiant, nu influențează sensibil rigiditatea dielectrică. Dacă însă cantitatea de apă crește, rigiditatea dielectrică scade foarte repede.

Instalațiile construite special pentru determinarea rigidității dielectrice a uleiului se compun din :

— un vas din material izolant, în care se pune uleiul de probat ;

— doi electrozi din cupru, alamă sau bronz, la care se aplică tensiunea ;

— un sistem de variație a tensiunii în trepte sau continuu ;

— un releu de protecție, destinat a întrerupe curentul în momentul străpungerii, pentru a se evita descompunerea uleiului.

Uleiul *TR* 30, conform STAS 871-81, (v. și tabelul 5.11), are rigiditatea dielectrică de 120 kV/cm (cel netratat) și de 200 kV/cm (cel tratat).

Măsurarea pierderilor dielectrice. Pierderile dielectrice devin hotărîtoare pentru tensiunile înalte și foarte înalte, în timp ce pentru tensiuni sub 35 kV are un rol secundar, factorul esențial în acest caz fiind formarea depunerilor (la transformatoarele de distribuție din posturile de transformare).

S-a constatat că apariția pierderilor dielectrice poate să preceadă începerea formării de depuneri. Creșterea tangentei unghiului de pierderi dielectrice ($tg\delta$) a uleiului este determinată atît de prezența în ulei a produselor de contaminare solubile care adesea se datoresc materialelor dizolvate ce intră în construcția transformatorului cît și de prezența umidității în ulei.

Măsurarea $tg\delta$ a uleiului are avantajul de a ajuta la depistarea înrăutățirii parametrilor uleiului mai devreme și mai bine, decît măsurarea oricărei alte caracteristici. Tangenta unghiului de pierderi dielectrice a uleiului este o măsură a pierderilor dielectrice într-un condensator, cînd dielectricul acestuia se compune exclusiv din uleiul considerat. Pentru determinarea $tg\delta$, uleiul se introduce într-o celulă specială, care se încălzește într-un vas de termostatare [16]. Cînd s-a ajuns la temperatura prescrisă, aceasta se menține constantă, celula fiind racordată la brațul punții de măsurare cu care se determină $tg\delta$ (STAS 6799-81).

Capitolul 3

CALCULUL ŞI PROIECTAREA TRANSFORMATORULUI

Se vor trata numai transformatoarele de putere; transformatoarele de măsură prezintă unele particularităţi constructive şi de calcul specifice, în principiu însă calculul lor este asemănător.

3.1. DATELE NOMINALE ALE TRANSFORMATORULUI

Datele nominale constituie acele date de la care se porneşte cu dimensionarea transformatorului şi pe care transformatorul trebuie să le asigure, după fabricaţie, în funcţionare.

Acestea sînt:

— puterea aparentă nominală: S_N, în VA sau kVA;

— tensiunile nominale din primar şi secundar: U_{1N}/U_{2N}, în V sau kV. La transformatoarele trifazate aceste tensiuni sînt cele de linie (între faze);

— treptele de reglaj al tensiunii, în % din U_N;

— factorul de putere al sarcinii: $\cos \varphi_2$ (în special la transformatoarele mici cu $S_N < 1$ kVA);

— frecvenţa tensiunii de alimentare: f, în Hz. În cazul în care nu se specifică altă valoare, se înţelege $f = 50$ Hz;

— numărul de faze m. Pentru transformatorul monofazat $m = 1$, iar pentru cel trifazat $m = 3$;

— conexiunile înfăşurărilor Y, D, Z etc. şi grupa de conexiuni;

— tipul constructiv: cu coloane, în manta etc.;

— sistemul de răcire: cu aer, cu ulei (cu circulaţie naturală sau forţată) etc.;

— alte date: curentul de funcţionare în gol I_0, pierderile în fier sau la funcţionarea în gol $P_0 \approx P_{Fe}$, pierderile electrice în înfăşurări sau de funcţionare în scurtcircuit la curentul nominal $P_{kN} = P_{w}$, tensiunea de scurtcircuit u_{kN} etc.

Nu întotdeauna este obligatoriu să se impună toate datele de mai sus; o parte din ele, dacă nu sînt impuse în mod special, se pot alege din standardele în vigoare.

De asemenea trebuie menţionat faptul că, de obicei, transformatoarele mici ($S_N < 1$ kVA) se construiesc cu răcire în aer, afară de cazurile cînd se impune un alt mod de răcire. Transformatoarele mai mari însă ($S_N > 1$ kVA) se construiesc, de obicei, cu răcire cu ulei, dacă, întocmai ca în primul caz, nu se impune, în mod special un alt mod de răcire.

3.2. CALCULUL CIRCUITULUI MAGNETIC AL TRANSFORMATORULUI [1, 2, 7]

Cum s-a menționat (v. paragraful 1.1), circuitul magnetic este constituit din coloane pe care se așază înfășurările transformatorului și din juguri, prin care se închide fluxul magnetic al coloanelor. Constructiv, formele secțiunilor coloanei și jugului pot fi dreptunghiulare sau în trepte.

Miezul magnetic cu secțiunea dreptunghiulară este mai ușor de executat (prin împachetare din tole egale), însă bobinele se construiesc mai greu, mai ales cînd este vorba de dimensiuni mari.

De aceea, de regulă, miezul cu secțiunea dreptunghiulară se folosește la transformatoarele mici ($S_N < 1$ kVA), care sînt, de obicei, monofazate.

La transformatoarele ceva mai mari ($S_N > 1$ kVA), se folosesc, mai frecvent, miezurile magnetice cu secțiunea în trepte. Dezavantajul acestora constă în faptul că fiind din mai multe trepte, tehnologia de împachetare este ceva mai dificilă. De asemenea, nici umplerea cercului (cu diametrul D_e) nu se poate face perfect, deoarece ar fi nevoie de un număr de trepte foarte mare. Tehnologia de fabricație însă, a bobinelor rotunde, este mai ușoară, iar rezistența mecanică a acestora la acțiunea forțelor electrodinamice (la scurtcircuite bruște) mai bună.

Numărul de trepte și dimensiunile fiecărei trepte corelate și cu cele ale jugului, constituie pentru fiecare fabrică elemente normalizate cu scopul tipizării cît mai mult a proceselor tehnologice de fabricație.

În figura 3.1 sînt reprezentate, de exemplu, cîteva forme constructive de miezuri în trepte și dimensiunile fiecărei trepte, astfel încît (pentru numărul respectiv de trepte) secțiunea ocupată de miez (din suprafața cercului cu diametrul D_e) să fie maximă.

Cum s-a menționat, ca materiale pentru miezurile magnetice de transformatoare, mai ales la cele mai mari, se folosește tablă silicioasă laminată la rece, cu cristale orientate, avînd, grosimea de 0,28—0,35 mm și pierderile

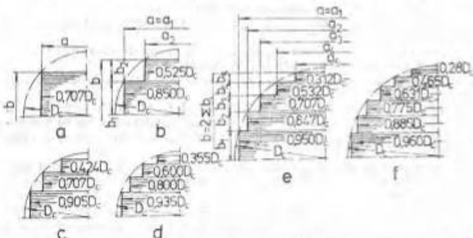


Figura 3.1. Dimensiunile treptelor miezului magnetic, astfel încît secțiunea miezului să fie maximă: a — cu o treaptă; b — cu două trepte; c — cu trei trepte; d — cu patru trepte; e — cu cinci trepte; f — cu șase trepte.

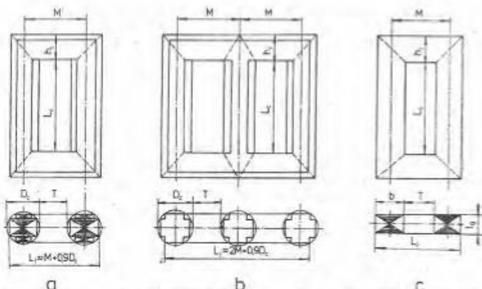


Figura 3.2. Dimensiunile principale ale unui miez magnetic: a — monofazat, cu două coloane în trepte; b — trifazat, cu trei coloane în trepte; c — monofazat, cu două coloane dreptunghiulare.

specifice la inducția de 1 T și frecvența de 50 Hz, $p_{10/50} = 0{,}47$ W/kg (cifra de pierderi specifice în fier la diferite inducții și frecvențe, precum și caracteristica de magnetizare $B = f(H)$, sînt elemente caracteristice ale materialului miezului magnetic și sînt furnizate de firma care fabrică tolele pentru miezul magnetic).

La transformatoarele mici, se folosește frecvent însă și tabla silicioasă laminată la rece cu cristale neorientate, avînd grosimea de 0,5 mm și pierderile specifice $p_{10/50} = 2{,}3$ W/kg.

În figura 3.2 a și b sînt reprezentate dimensiunile principale ale miezurilor magnetice cu coloane (monofazate și trifazate), avînd forma secțiunii miezului în trepte. În mod similar, se reprezintă și miezurile cu secțiunea coloanei dreptunghiulară, a cărei lățime este b (fig. 3.2 c).

De multe ori, transformatoarele mici se construiesc cu miezul în manta. În figura 3.3 este reprezentat un astfel de transformator bobinat; poziția 2 reprezintă tola miezului cu dimensiunile respective.

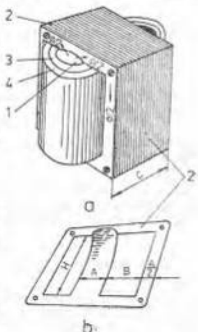


Figura 3.3. Transformator monofazat în manta cu tole din întregul: a — transformatorul (vedere); b — tola miezului; 1 — spațiu prevăzut în carcasa bobinei pentru împachetarea miezului; 2 — tola miezului; 3 — bobină primară; 4 — bobină secundară.

3.2.1. CALCULUL SECȚIUNILOR COLOANEI ȘI JUGULUI

— Secțiunea (transversală) netă de fier a coloanei se determină, orientativ cu relația

$$S_c = C_i \sqrt{\frac{S_1}{f}} \quad [m^2], \tag{3.1}$$

în care:

S_1, este puterea aparentă a transformatorului pe o coloană, în VA.

În funcție de puterea nominală S_N a transformatorului, în VA, rezultă:

$S_1 = S_N$ [VA], pentru transformatorul monofazat în manta și pentru transformatorul monofazat cu înfășurările concentrice dispuse (pe o coloană);

$S_1 = \frac{S_N}{2}$ [VA], pentru transformatorul monofazat cu înfășurările dispuse pe două coloane;

$S_1 = \frac{S_N}{3}$ [VA], pentru transformatorul trifazat cu înfășurările pe trei coloane (concentrice);

f — frecvența tensiunii de alimentare, în Hz;

$C_i = (4 - 6) \cdot 10^{-4}$ — constantă de calcul. În medie, se poate lua $C_i = 5 \cdot 10^{-4}$.

— *Dimensiunile geometrice ale coloanei* rezultă din valoarea secțiunii nete a coloanei, pe baza următoarelor relații:

— pentru secțiunea coloanei, în trepte (fig. 3.2 a, b)

$$S_c = k_u \frac{\pi D_c^2}{4} \quad [m^2], \tag{3.2}$$

de unde rezultă, diametrul coloanei:

$$D_c = \sqrt{\frac{4S_c}{\pi k_u}} \quad [m]; \tag{3.2 a}$$

— pentru secțiunea coloanei dreptunghiulare (fig. 3.2 c)

$$S_c = k_{Fe} b l_g \quad [m^2], \tag{3.3}$$

de unde rezultă l_g cînd se impune b, sau invers (orientativ se poate lua raportul $b/l_g = 1 \ldots 1{,}5$),

în care:

k_{Fe}, este coeficientul de împachetare al miezului, adică de umplere cu fier al spațiului ocupat de tole. Pentru tole de 0,35 mm din tablă silicioasă laminată la rece cu cristale orientate și izolate cu carlit,

$$k_{Fe} = 0{,}94 \ldots 0{,}96. \tag{3.4}$$

Pentru tabla laminată la rece cu cristale neorientate (grosime 0,5 mm), $k_{Fe} = 0{,}95$;

$k_u = k_{Fe} k_g$, este coeficientul total de umplere al cercului (cu diametrul D_c) cu fier și care depinde atît de k_{Fe} cît și de coeficientul geometric de umplere a cercului k_g. La rîndul lui k_g depinde direct de numărul de trepte ale

miezului coloanei, de modul de stringere al acestuia şi la transformatoarele cu canale de răcire în miez, de lărgimea acestor canale. În tabelul 3.1 este dat numărul orientativ de trepte în funcţie de dimaetrul D_c al coloanei şi coeficientul k_g corespunzător.

TABELUL 3.1

Numărul orientativ de trepte n_{tr} în funcţie de diametrul D_c al coloanei şi coeficientul k_g corespunzător, pentru diferite moduri de stringere a miezului coloanei.

a) Miez strins cu înfăşurarea sau prin lipire cu lac şi fără canale de răcire.

D_c [cm]	<8	8	9	10÷18	20÷30	32÷40
n_{tr} k_g	3 0,851	4 0,877	5 0,915	6 0,915–0,92	7–8 0,918–0,925	9–11 0,915–0,925

b) Miez strins cu bandă de sticlă sau de oţel (fără a forma spiră cu scurtcircuit) şi n_c canale longitudinale

D_c [cm]	20÷26	28÷30	32÷34	36÷38	40÷42	45÷50
n_{tr} n_c k_g	7 — 0,90	7 — 0,91	8 — 0,910	8 1 0,90	10 1 0,910	13 1 0,915

c) Miez pentru transformatoarele uscate

D_c [cm]	<8	8	9÷14	16÷22	24÷26	28÷32
n_{tr} n_c k_g	3 — 0,851	4 — 0,877	5–6 — 0,915–0,920	7–8 — 0,930–0,935	7 1 0,90	8 2 0,920

Notă. 1. Numărul treptelor n_{tr} şi al canalelor longitudinale n_c date în tabel pot fi modificate din considerente tehnico-economice ale întreprinderii constructoare.

2. La calculul factorului k_g s-au luat în considerație şi canalele n_c, largi de 6 mm pentru miezurile în ulei şi de 20 mm pentru cele în aer.

3. La transformatoarele uscate, pentru $D_c \leq 22$ cm, stringerea se face cu înfăşurarea şi cu pene; pentru $D_c > 22$ cm, stringerea se face cu bandă de sticlă sau de oţel.

După definitivarea şi rotunjirea dimensiunilor geometrice ale coloanei (b, l_s sau D_c), se recalculează valoarea definitivă a secţiunii coloanei cu relaţiile (3.2) sau (3.3), în care se folosesc, de asemenea, şi valorile exacte ale coeficienţilor k_s şi k_{Fe}.

Este indicat ca secţiunea coloanei să se determine din dimensiunile fiecărei trepte cu relaţia

$$S_c = k_{Fe} 2 \sum_{i=1}^{n_{tr}} a_i b_i \quad [m^2], \tag{3.4 a}$$

unde (v. fig. 3.1 şi fig. 3.45), a_i şi b_i reprezintă lăţimea şi respectiv grosimea treptei i (n_{tr}, fiind numărul de trepte ale coloanei).

Secțiunea (transversală) netă a jugului se ia egală sau mai mare cu circa 10% decît secțiunea coloanei, deoarece jugurile miezului magnetic al transformatorului au condiții de răcire mai dificile decît ale coloanelor (*jugul inferior este în partea de jos* unde nu circulă uleiul de răcire, iar *jugul superior este în partea de sus* unde uleiul este cald și se îndreaptă spre radiatoarele de răcire). Astfel:

— pentru miezurile dreptunghiulare, cu coloane, răcite cu aer

$$S_j = S_c; \tag{3.5}$$

— pentru miezurile în manta

$$S_j = \frac{1}{2} S_c; \tag{3.6}$$

— pentru miezurile în trepte și în ulei

$$S_j = \beta_j S_c = (1{,}03 \div 1{,}1) S_c. \tag{3.7}$$

Dimensiunile geometrice ale jugului pentru valoarea calculată a secțiunii, rezultă în funcție de forma secțiunii jugului (în trepte sau dreptunghiulară), similar ca dimensiunile coloanei, din relațiile (3.2) și (3.3).

Teoretic numărul de trepte ale secțiunii jugului ar trebui să fie egal cu cel al secțiunii coloanei n_{tr}.

Dar, deoarece se dorește ca $S_j > S_c$, atunci numărul de trepte al secțiunii jugului se ia cu una, cel mult cu două trepte mai mic. Acest lucru (creșterea secțiunii jugului S_j) se face în mod uzual prin realizarea ultimei sau ultimelor două trepte la lățimea treptei anterioare, grosimile b_i rămînind aceleași ca la coloană.

De exemplu, presupunînd că $n_{tr} = 5$ (fig. 3.1 e), se încearcă mai întîi jugul cu 4 trepte, făcînd pe $a_5 = a_4$; dacă S_j calculat cu relația (3.4 a) rezultă prea mic ($S_j < 1{,}03\ S_c$), atunci se măresc ultimele două trepte făcînd $a_5 = a_4 = a_3$ după care se recalculează S_j, care trebuie să se încadreze în limitele date de relația (3.7).

Ca și la coloană, după definitivarea și rotunjirea dimensiunilor geometrice ale jugului, se recalculează valoarea definitivă a secțiunii jugului S_j.

3.2.2.1. DIMENSIUNILE FERESTREI TRANSFORMATORULUI

Fereastra transformatorului (spațiul în care se amplasează înfășurările) este determinată de dimensiunile finite ale înfășurărilor și distanțele de izolație corespunzătoare, distanțe care depind în primul rînd de tensiunile nominale.

Trebuie menționat că transformatoarele mici au, în general, tensiunile nominale primare și secundare sub 1 000 V ceea ce înseamnă că nu sînt necesare anumite distanțe izolante, impuse, așa cum se recomandă la tensiuni peste 1 000 V.

Din această cauză, rezultă că ferestrele transformatoarelor de tensiuni mici vor fi procentual mai mici, decît ferestrele transformatoarelor de aceeași putere, dar de tensiuni mai mari.

De aceea, la transformatoarele mici, este mai comod ca dimensionarea lățimii ferestrei să se facă definitiv după stabilirea înfășurărilor. Este necesar însă, în prealabil, să se determine prin calcul înălțimea ferestrei în funcție de care rezultă înălțimea bobinei (vezi și exemplul de calcul de la paragraful 3.9.1).

Deoarece nu se cunosc încă, în această etapă, dimensiunile înfășurărilor, se va face o dimensionare prealabilă a ferestrei, urmînd ca dimensiunile definitive să fie stabilite după calculul înfășurărilor.

— *Înălțimea coloanei* (și a ferestrei) se determină, orientativ (v. fig. 3.2), cu relația

$$L_c = \frac{S_1}{100 A c_1} \ [\mathrm{m}] = \frac{S_1}{A c_1} \ [\mathrm{cm}], \tag{3.8}$$

în care:

S_1, are aceeași semnificație ca în relația (3.1), în VA;

A, este pătura de curent a transformatorului, în A/cm.

Prin definiție,

$$A = \frac{w_1 I_1}{L_c} \ [\mathrm{A/cm}]. \tag{3.8 a}$$

Deoarece nu se cunoaște încă numărul de spire al înfășurării primare w_1, pentru a calcula pe A, se estimează inițial valoarea lui A, din tabelul 3.2;

TABELUL 3.2

Valorile inducției magnetice maximă, în coloană B_c, păturii de curent A și densității de curent J, pentru transformatoarele cu înfășurări din cupru.

Categoria	mici	mijlocii și mari						
Răcirea	în aer	în ulei						
S_N [kVA]	⩽1	1–5	5–10	10–50	50–100	100–1 000	1 000–10 000	>10 000
B_c [T]	1–1,1	1,2–1,35	1,25–1,4	1,45–1,6	1,55–1,65	1,65–1,7	1,67–1,71	1,68–1,73
A [A/cm]	80–120	150–180	175–210	200–250	220–300	250–400	400–600	500–750
J [A/mm²]	2,5–3	2,2–2,5	2,3–2,7	2,3–3,0	2,4–3,2	2,5–3,3	2,6–3,5	3,2–4,2

Notă. 1. La transformatoarele mici valoarea inducției B_c este indicată pentru cazul cînd miezul se confecționează din tablă laminată la rece cu cristale neorientate, cu grosimea de 0,5 mm; în celelalte cazuri se consideră tablă laminată la rece cu cristale orientate, groasă de 0,3 mm.

2. Pentru transformatoarele în ulei cu înfășurări din aluminiu, densitatea de curent J, se ia mai mică cu 30–40% față de cea din tabel, pentru puterea respectivă, adică

$$J_{Al\,(ulei)} \approx (0,6-0,7) J_{Cu(ulei)}.$$

3. Pentru transformatoarele mijlocii, cu înfășurări din cupru și răcire cu aer (uscate) se recomandă, pentru densitatea de curent următoarele limite:

$J_{Cu(aer)} \approx (0,5-0,6) J_{Cu(ulei)}$ — pentru cazul în care transformatorul uscat are înfășurările în clasa de izolație A;

$J_{Cu(aer)} \approx J_{Cu(ulei)}$ — pentru cazul în care transformatorul uscat are înfășurările în clasa de izolație F (prin $J_{Cu(ulei)}$ se înțeleg valorile din tabel).

e_1 — tensiunea electromotoare (t.e.m.) indusă într-o spiră, în V, care se determină cu relația

$$e_1 = \pi\sqrt{2} f\Phi = 4{,}44 f\Phi = 4{,}44 f S_c B_c \quad [\mathrm{V}], \qquad (3.8\ \mathrm{b})$$

unde:

B_c este inducția magnetică în coloană (amplitudinea), în T, care se ia, preliminar, din tabelul 3.2;

S_c — secțiunea coloanei, obținută cu relațiile (3.2) sau (3.3), după stabilirea dimensiunilor, în m².

Cum se vede din relația (3.8 b),

$$\Phi = B_c S_c \quad [\mathrm{Wb}], \qquad (3.8\ \mathrm{c})$$

reprezintă amplitudinea fluxului magnetic util al transformatorului.

— *Lățimea ferestrei* se determină defitiniv după dimensionarea înfășurărilor.

Preliminar însă, *distanța dintre coloane* (fig. 3.2) se determină cu relațiile aproximative:

— pentru miezul cu secțiunea coloanei dreptunghiulară

$$M = \alpha b \quad [\mathrm{m}]; \qquad (3.9)$$

— pentru miezuri cu secțiunea coloanei în trepte (înscrisă în cercul cu diametrul D_c)

$$M = \alpha D_c \quad [\mathrm{m}], \qquad (3.9\ \mathrm{a})$$

în care:

$\alpha \approx 1{,}8\ldots2{,}3$, pentru transformatoarele în ulei, cu înfășurarea din cupru (în medie se poate lua $\alpha \approx 2$);

$\alpha \approx 2{,}2\ldots2{,}6$, pentru transformatoarele în ulei, cu înfășurarea din aluminiu (în medie se poate lua $\alpha \approx 2{,}3$—$2{,}4$).

Pentru transformatoarele uscate (în aer), valorile lui α se iau mai mari cu 40—50% decît limitele de mai sus, ale transformatoarelor în ulei, adică

$$\alpha_{us} \approx (1{,}4\ldots1{,}5)\alpha_{ulei}.$$

Lățimea ferestrei transformatorului (a spațiului în care se introduc înfășurările) rezultă astfel (valoare preliminată)

$$T = M - b\ (\text{sau } D_c) \quad [\mathrm{m}]. \qquad (3.9\ \mathrm{b})$$

Lungimea medie a jugurilor magnetice, pentru fazele marginale, rezultă cu relațiile (vezi fig. 3.2 a și b):

— pentru transformatorul monofazat cu coloane

$$L_j \approx M + 0{,}9\ D_c \quad [\mathrm{m}]; \qquad (3.9\ \mathrm{c})$$

— pentru transformatoarele trifazate cu coloane

$$L_j \approx 2\ M + 0{,}9\ D_c \quad [\mathrm{m}]; \qquad (3.9\ \mathrm{d})$$

— pentru transformatorul monofazat în manta (fig. 3.6 c)

$$L_j = 2(b + T) \quad [\mathrm{m}]. \qquad (3.9\ \mathrm{e})$$

Se recomandă cu aceste dimensiuni ale miezului, o verificare prealabilă a pierderilor în fier cu relația (3.44).

3.3. CALCULUL ÎNFĂŞURĂRILOR TRANSFORMATORULUI [1, 2, 4]

Înfăşurările transformatorului — primară 1 şi secundară 2 — pot fi aşezate fie pe aceeaşi coloană, prin suprapunere (la transformatorul monofazat în manta şi cel trifazat), fie pe coloane separate (de regulă, la transformatorul monofazat cu două coloane).

— *La transformatoarele mici*, de obicei uscate (în aer) bobinele se confecţionează din conductor rotund cu diametrul maxim pînă la 2—2,5 mm sau din conductor profilat (dreptunghiular cu muchiile rotunjite) mai ales cele la tensiunea joasă.

Izolaţia conductorului este din email tereftalic (*ET*), cu grosime de 0,06—0,12 mm bilateral, fie din email tereftalic peste care se mai prevăd şi două straturi din fire de sticlă (*E2S*) cu grosimea bilaterală de 0,4—0,5 mm pe ambele laturi. Se obţine astfel o înfăşurare cu izolaţia în clasa *F* cu supratemperatura admisă — peste cea a mediului ambiant — de 100°C.

Confecţionarea bobinei (sau bobinelor) se face prin depănarea conductorului direct pe o carcasă izolantă (fig. 3.4), carcasă care constituie şi izolaţia faţă de masă.

După confecţionare, înainte de asamblarea pe miez, bobina se impregnează cu lac, corespunzător clasei de izolaţie *F*.

— *La transformatoarele mijlocii şi mari*, în general, bobinele se confecţionează separat (pe şabloane), izolaţia faţă de miez fiind constituită şi ea separat din cilindri şi rame izolante circulare (la cele două capete ale bobinelor).

Dacă răcirea este în aer, atunci se folosesc tot conductoare izolate în clasa *F* ca şi la transformatoarele mici.

Dacă răcirea este în ulei, atunci izolaţia conductorului este din 2÷5 straturi de bandă din hîrtie înfăşurată pe conductor prin suprapunere avînd o grosime totală (pe ambele părţi) de 0,25÷0,5 mm, pentru conductoarele rotunde şi de 0,3÷0,6 mm pentru cele profilate. Numărul straturilor de hîrtie şi grosimea bilaterală a izolaţiei conductoarelor este conform STAS 6163-76.

În construcţia înfăşurărilor transformatoarelor se are în vedere aşa-zisa *coordonare a izolaţiei*, care constă din următoarele măsuri:

— primele 5—6% şi ultimele 5—6% din spire, se izolează suplimentar (de regulă au izolaţie dublă faţă de restul spirelor) pentru a rezista la supratensiuni;

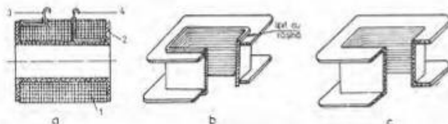


Figura 3.4. Bobină cu carcasă pentru transformatoarele mici: a — bobina cu carcasă; 1 — bobina; 2 — carcasa; 3 — clemă de ieşire; 4 — clemă de intrare; b — carcasă confecţionată din stratificate; c — carcasă din mase de turnare.

— din motive de utilizare mai rațională a izolațiilor și distanțelor de izolație, cînd înfășurările transformatorului sînt concentrice (una peste alta), atunci, întotdeauna, la interior (adică lîngă miezul magnetic el coloanei), se prevede înfășurarea de joasă tensiune, care se va nota cu indice *j*, iar la exterior (peste ea) înfășurarea de înaltă tensiune, care se va nota cu indice *i* (vezi fig. 3.7, fig. 3.8 și tabelul 3.3).

3.3.1. STABILIREA NUMĂRULUI DE SPIRE

— Pentru *înfășurarea primară*:

— numărul de spire, corespunzător t.e.m. nominale de fază

$$w_1 = \frac{E_1}{e_1} = \text{nr. întreg}; \tag{3.10}$$

— numărul de spire corespunzător treptei maxime de reglaj a tensiunii primare (adică reglajul se face în limitele $\pm k'\Delta u\%$)

$$\Delta w_1 = \frac{k'\Delta u\%}{100} w_1; \tag{3.10 a}$$

— numărul total de spire al înfășurării primare

$$w_{1T} = w_1 + \Delta w_1; \tag{3.10 b}$$

— Pentru *înfășurarea secundară*

$$w_2 = \frac{E_2}{e_1} = \text{nr. întreg}, \tag{3.10 c}$$

în care:

e_1 este t.e.m. indusă într-o spiră, în V, dată de relația (3.8 b);

E_1, E_2 — t.e.m. de fază din primar și secundar, în V, date de relațiile:

— pentru transformatoarele mici ($S_N < 1$ kVA)

$$E_1 = U_{1f} - \frac{\Delta u[\%]U_{1f}}{200}\ [\text{V}]; \qquad E_2 = U_{2f} + \frac{\Delta u[\%]U_{2f}}{200}\ [\text{V}]; \tag{3.11}$$

— pentru transformatoarele mijlocii și mari ($S_N > 1$ kVA)

$$E_1 \approx U_{1f}; \qquad E_2 \approx U_{2f}, \tag{3.11 a}$$

unde:

U_{1f} și U_{2f}, sînt tensiunile nominale de fază ale înfășurării primare respectiv ale înfășurării secundare, în V și anume:

— pentru înfășurarea transformatorului monofazat

$$U_{1f} = U_{1N}; \quad U_{2f} = U_{2N};$$

— pentru înfășurarea transformatorului trifazat, cu conexiunea stea (Y, y)

$$U_{1f} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}};\; U_{2f} = \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}};$$

— pentru înfășurarea transformatorului trifazat, cu conexiunea triunghi (Δ sau D, d)

$$U_{1f} = U_{1N};\; U_{2f} = U_{2N};$$

$\Delta u(\%)$ este căderea de tensiune, procentuală, a transformatorului de mică putere. Orientativ, valoarea lui $\Delta u(\%)$ se ia din figura 3.5.

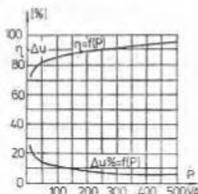


Figura 3.5. Randamentul și căderea de tensiune (în procente), ale transformatoarelor de putere mică.

Valorile lui w_1 și w_2 obținute cu relațiile (3.10) și (3.10 c), se rotunjesc la numere întregi, însă astfel încît raportul de transformare

$$k = \frac{E_1}{E_2}$$

să se mențină în toleranțele indicate în tabelul 2.2.

De aceea, după rotunjirea la număr întreg a unui număr de spire (de regulă w_1), se recalculează celălalt număr de spire, din raportul k (vezi exemplul de calcul).

— *Valorile definitive* ale fluxului și inducțiilor magnetice:

— fluxul magnetic util (amplitudinea)

$$\Phi = \frac{E_1}{\pi\sqrt{2}fw_1} = \frac{E_1}{4{,}44\, fw_1} \quad [\text{Wb}]; \tag{3.12}$$

— inducția magnetică în coloană

$$B_c = \frac{\Phi}{S_c} \quad [\text{T}], \tag{3.12 a}$$

valoare care trebuie să fie apropiată de cea estimată inițial din tabelul 3.2;

— inducția magnetică în jugul transformatoarelor cu coloane

$$B_j = \frac{\Phi}{S_j} \quad [\text{T}]; \tag{3.12 b}$$

— inducția magnetică în jugul transformatoarelor în manta

$$B_j = \frac{\Phi}{2S_j} \quad [\text{T}]; \tag{3.12 c}$$

— t.e.m. într-o spiră

$$e_1 = E_1/w_1 \quad [\text{V/spiră}]. \tag{3.12 d}$$

3.3.2. SECȚIUNILE ȘI DIMENSIUNILE CONDUCTOARELOR

— *Curenții nominali* ai transformatorului:

— pentru transformatoarele mici ($S_N < 1$ kVA)

$$I_1 = \frac{S_N \cos\varphi_2}{mU_{1f}\eta\cos\varphi_1}\ [\mathrm{A}];\quad I_2 = \frac{S_N}{mU_{2f}}\ [\mathrm{A}]; \tag{3.13}$$

— pentru transformatoarele mai mari ($S_N > 1$ kVA)

$$I_1 \approx \frac{S_N}{mU_{1f}}\ [\mathrm{A}];\quad I_2 = \frac{S_N}{mU_{2f}}\ [\mathrm{A}], \tag{3.13 a}$$

în care:

η este randamentul transformatorului, care se ia orientativ din figura 3.5;

m — numărul de faze. Pentru transformatorul monofazat $m = 1$, iar pentru cel trifazat $m = 3$;

$\cos\varphi_1 = 0{,}9\ldots0{,}92$ deoarece, de obicei, $\cos\varphi_2 = 1$, iar miezul magnetic este din tole de calitate superioară.

O valoare mai exactă a lui $\cos\varphi_1$ se poate determina cu relația

$$\cos\varphi_1 \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_{1\mu}}{I_{1a}}\right)^2}}.$$

— *Secțiunile și dimensiunile* conductoarelor:

$$s_{c1} = \frac{I_1}{J_1}\ [\mathrm{mm}^2];\quad s_{c2} = \frac{I_2}{J_2}\ [\mathrm{mm}^2], \tag{3.14}$$

în care:

J_1, J_2 sînt densitățile de curent din înfășurarea primară și secundară, în A/mm^2 și se iau din tabelul 3.2.

De obicei, în cazul în care condițiile de răcire ale înfășurărilor sînt identice, se ia

$$J_1 = J_2.$$

Dacă înfășurările nu au condiții de răcire identice, atunci se poate lua

$$J_1 \neq J_2,$$

valoarea mai mică avînd-o înfășurarea cu condiții mai grele de răcire (cu grosime mai mare, fără canale etc.).

Pentru valorile secțiunilor obținute cu relațiile (3.14) se stabilesc dimensiunile definitive ale conductoarelor din STAS-ul de conductoare.

Astfel, pentru valorile secțiunilor mai mici ca 5—6 mm^2 (la transformatoarele mici) se alege din STAS (vezi anexa 1) conductor rotund, care, de regulă, este izolat numai cu email tereftalic (*ET*) pentru cupru și cu hîrtie pentru aluminiu.

Se stabilesc astfel definitiv:

$$
\begin{aligned}
&\text{— diametrele } \frac{d_1}{d_1'} \xrightarrow{\text{(STAS)}} s_{e1}, \text{ pentru primar;}\\
&\text{— diametrele } \frac{d_2}{d_2'} \xrightarrow{\text{(STAS)}} s_{e2}, \text{ pentru secundar,}
\end{aligned}
\tag{3.14 a}
$$

unde:

d_1, d_2 sînt diametrele neizolate, iar d_1', d_2' diametrele izolate.

Dacă valoarea secțiunii este mai mare ca 6 mm², atunci din STAS (vezi anexa 2) se alege conductor dreptunghiular (profilat), care este izolat cu email tereftalic (tip *PET*) sau email tereftalic peste care se dau și două straturi de fire de sticlă (tip *PE2S*) pentru transformatoarele uscate (răcite cu aer), și izolat cu hîrtie pentru transformatoarele cu ulei (de la 2 la 5 straturi 1/2 sau 1/3 suprapus).

Se stabilește, deci, definitiv, conductor cu dimensiunile

$$\frac{a \times b \text{ (neizolat)}}{a' \times b' \text{ (izolat)}} \xrightarrow{\text{(STAS)}} s_{e}. \tag{3.14 b}$$

Grosimile izolațiilor în funcție de care rezultă dimensiunile conductoarelor izolate (d' sau a', b') sînt indicate orientativ în anexa 3 (în practică valorile exacte sînt date de fabrica furnizoare de conductori).

Observație: În lucrarea de față se consideră că a este dimensiunea conductorului pe grosimea bobinei, iar b pe înălțimea bobinei și $a < b$.

Cu valorile definitive, din STAS, ale secțiunilor conductoarelor, se stabilesc valorile definitive ale densităților de curent:

$$J_1 = \frac{I_1}{s_{e1}} \text{ [A/mm}^2\text{]}; \quad J_2 = \frac{I_2}{s_{e2}} \text{ [A/mm}^2\text{]}, \tag{3.14 c}$$

valori care trebuie să se încadreze în limitele indicate în tabelul 3.2.

3.3.3. DIMENSIUNILE ÎNFĂȘURĂRILOR ȘI ALE FERESTREI TRANSFORMATORULUI

După cum s-a arătat (vezi paragraful 3.2.2), între dimensiunile înfășurărilor ferestrei și tensiunile transformatorului există o strînsă legătură.

A. **La transformatoarele mici**, care au, de regulă, tensiuni nominale sub 1 000 V, nu sînt necesare anumite spații sau distanțe cu rol izolant între înfășurări și masa miezului sau între înfășurări, așa cum se recomandă la cele de tensiuni înalte ($U_N > 1$ kV), ci se prevăd numai izolațiile strict necesare, ale căror grosimi sînt mult mai mici.

De aceea, la transformatoarele mici, așa cum reiese și din figura 3.6, dimensiunile ferestrei rezultă din condiția de a încăpea înfășurările cu carcasa respectivă. Se observă, în acest caz, că din cele două dimensiuni ale ferestrei (T și L_c), pentru dimensionarea definitivă este necesară, inițial numai una (de obicei L_c), din care rezultă înălțimea bobinei H_B, cealaltă dimensiune T rezultînd în funcție de grosimile a_1 și a_2 ale înfășurărilor.

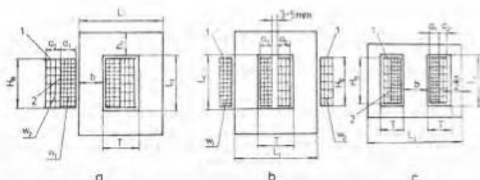


Figura 3.6. Dimensiunile înfășurărilor și miezului transformatoarelor monofazate mici: a — transformator cu două coloane cu înfășurările suprapuse; b — transformator cu două coloane cu înfășurările dispuse pe coloane separate; c — transformator în manta; 1 — carcasa bobinelor; 2 — izolația dintre înfășurări.

Pentru dimensionarea înfășurărilor și ferestrei sînt necesare următoarele etape:

— se determină înălțimea bobinelor

$$H_B = L_c - 5 \text{ mm}, \tag{3.15}$$

considerînd că 2 mm este grosimea carcasei, iar 0,5 mm joc (sus și jos) de asamblare (H_B și L_c se iau în mm);

— se determină numărul de spire pe un strat ale fiecărei bobine:

— pentru conductorul rotund

$$w_{s1} = \frac{H_B}{d_1'}; \quad w_{s2} = \frac{H_B}{d_2'}; \tag{3.16}$$

— pentru conductorul profilat

$$w_{s1} = \frac{H_B}{b_1'}; \quad w_{s2} = \frac{H_B}{b_2'}, \tag{3.16, a}$$

în care b_1', b_2', este latura mare cu izolația pe ambele părți a conductorului înfășurării primare, respectiv secundare;

— se determină numărul de straturi ale fiecărei bobine:

$$n_{s1} = \frac{w_1}{w_{s1}} = \text{nr. întreg}; \quad n_{s2} = \frac{w_2}{w_{s2}} = \text{nr. întreg}, \tag{3.17}$$

valori care se rotunjesc la numărul întreg imediat superior;

— se determină grosimile bobinelor:

— pentru conductorul rotund

$$a_1 = n_{s1}d_1' \text{ [mm]}; \quad a_2 = n_{s2}d_2' \text{ [mm]}; \tag{3.18}$$

— pentru conductorul profilat:

$$a_1 = n_{s1}a_1' \text{ [mm]}; \quad a_2 = n_{s2}a_2' \text{ [mm]}, \tag{3.18, a}$$

în care a_1', a_2', reprezintă latura mică cu izolația pe ambele părți a conductorului înfășurării primare, respectiv secundare;

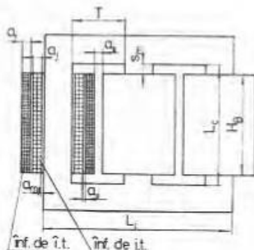


Figura 3.7. Așezarea înfășurărilor și dimensiunile lor principale, la transformatorul cu coloane.

— lățimea ferestrei rezultă (ținînd cont și de grosimea de 2 mm a carcasei):
— pentru înfășurările suprapuse (fig. 3.6 a, c)

$$T = 1 + 2 + a_1 + a_2 + (3—5) \quad [\text{mm}]; \tag{3.19}$$

— pentru înfășurările separate (fig. 3.6, b)

$$T = 2(1 + 2) + a_1 + a_2 + (3—5) \quad [\text{mm}], \tag{3.19, a}$$

în care:

1 mm este jocul (pe o parte) între interiorul carcasei și miez;
2 mm — grosimea carcasei;
3—5 mm — distanța de asamblare (în care se include și grosimea izolației dintre bobine — poz. 2).

B. **La transformatoarele mijlocii și mari**, care au tensiuni și curenți mari (a se vedea și paragraful 1.2), înfășurările se pot realiza cu bobine concentrice sau alternate (cu galeți alternați).

Modul, cel mai frecvent, de așezare pe coloane a înfășurărilor concentrice (care sînt și cele mai utilizate) și principalele dimensiuni ale lor, este indicat în figura 3.7.

În figura 3.8 se prezintă detaliat acest mod de așezare, indicîndu-se și distanțele de izolare atît între înfășurări cît și față de coloanele și jugurile miezului magnetic, în funcție de care, prin construcția grafică la scară sau prin calcul, se determină dimensiunile considerate definitive L_c și T, ale ferestrei transformatorului (dacă se verifică tensiunile de scurtcircuit și încălzirile). Valorile acestor distanțe de izolare necesare, în funcție de tensiunile nominale ale înfășurărilor transformatoarelor în ulei și uscate, sînt indicate în tabelul 3.3.

Figura 3.8. Distanțele de izolare la transformatorul de înaltă tensiune cu coloane.

TABELUL 3.3

Izolația tip a transformatoarelor cu coloane (fig. 3.8).

a) Distanțele de izolare pentru transformatoarele în ulei, în cm.

(a)* $U_{N(inf)}$ [kV]	(b)* U_{ine} [kV]	JT față de miez**			Inf. față de jug**	Între JT și IT		Între IT și IT (între bobinele de IT vecine)		
		a_{mJ}	g_{mJ}	s_{jc}	s_4, s_{jkc}, s_{im} (1)	a_{JI}	g_{JI}	a_{II}	g_{II}	s_i
1	5	0,3–0,4	0,3	—	2	—	—	—	—	—
3	16	0,6	0,3	0,8	2	0,6	0,3	0,6	—	1
6	22	0,6	0,3	1	2,2	0,8	0,3	0,7	—	1,2
10	28	0,6	0,3	1	2,5	0,8	0,3	0,8	0,3	1,5
20	50	0,8	0,4	2	3	1,2	0,4	1	0,4	2
35	80	1,4	0,6	4	6	1,8	0,6	1,6	0,5	4,5
60	140	1,8	0,8	8,5	11,5	3,4	0,8	18,0	0,8	9
110	185	2,0	1,0	12	15	4,0	1,0	20,0	1,0	12,5

* *(a)* În STAS 1703/3-80, în loc de U_N se prevede U_m (tensiunea cea mai ridicată a înfășurării — valoare eficace).

(b) Pentru U_m și U_{ine}, vezi tabelul 2.3.

** Distanțele față de masa miezului, se determină pentru fiecare înfășurare, în funcție de tensiunea nominală U_N, a acesteia. Exemplu: a_{mJ}, s_{jm} — pentru U_{NJ}; s_{im} — pentru U_{NI}.

Distanțele între înfășurări (a_{JI} și a_{II}) se determină pentru tensiunea înaltă U_{NI}.

(1) Distanța s_4 servește la dimensionarea cuvei (vezi fig. 3.47).

OBSERVAȚIE.

Toate distanțele sînt indicate din punct de vedere al izolării. Pentru scoaterea bornelor și pentru ecranele de protecție se măresc distanțele respective cu spațiul necesar acestora.

TABELUL 3.3 (continuare)

b) Distanțele de izolare pentru transformatoarele uscate, în cm.

$U_{N(Is/I)}$ [kV]	U_{inc} [kV]	JT față de miez			Inf. față de jug	Între JT și IT		Între IT și IT (între bobinele de IT vecine)		
		a_{mj}	g_{mj}	s_{mj}	s_{i}, s_{im}	a_{ji}	g_{ji}	a_{ii}	g_{ii}	s_{ii}
1	3	1÷2	—	—	1,5	1,0	—	1,0	—	—
3	10	1÷2	—	—	2,0	1,5	—	1,0	—	—
6	20	1÷2	0,3	4,5	5,5	2,5	0,3	2,5	0,4	4,5
10	28	1÷2	0,4	7,0	8,0	3,5	0,4	4	0,6	7,0
15	38	1÷2	0,5	10	11,0	3,8	0,5	4,5	1	10
20	50	1÷2	0,5	12	13,0	4	0,5	4,5	1	12

Notă. 1. Limita maximă a distanței a_{mj}, este indicată din punct de vedere al răcirii.

2. Distanțele a_{ji} și a_{ii} din tabel, sînt considerate minime din punct de vedere al izolării și nu sub aspectul circulației aerului de răcire.

3. Cînd înfășurarea de JT este spiralată, la $U_N = 1$ kV se ia $a_{mj} \geqslant 2$ cm, iar $g_{mj} = 0,4$ mm.

Se atrage atenția că valorile distanțelor de izolație indicate în tabelul 3.3, trebuie corelate și cu o serie de măsuri constructive, menite să îmbunătățească rigiditatea dielectrică a lor. În figurile 3.49 și 3.50 se indică două moduri concrete de realizare a acestor izolații.

După cum se observă din figura 3.50, cînd tensiunea nominală a unei înfășurări (sau a ambelor) $U_N \geqslant 20$ kV, se prevăd atît *cilindrii izolanți moi* cu grosimi de 2—5 mm, realizați din mai multe straturi de hîrtie și răsfrînți la capete peste înfășurare (poziția 7), cît și *șaibe izolante răsfrînte* cu grosimi de 2—6 mm, confecționate separat din carton electrotehnic (poziția 8). Aceste măsuri contribuie substanțial la o bună comportare a distanțelor de izolație prevăzute în tabelul 3.3, mai ales la impulsul de tensiune.

Așa cum s-a amintit și cum se observă și din figurile 3.7 și 3.8, lîngă miezul coloanei se află înfășurarea de joasă tensiune (notată cu indicele *j* sau 2), iar peste ea, înfășurarea de înaltă tensiune (notată cu indicele *i* sau 1). Suprapunerea înfășurărilor se poate face fie direct din procesul de fabricație al bobinelor sub formă de *înfășurare monolit* (la transformatoarele de puteri mai mici) fie cînd bobinele sînt fabricate separat, la asamblarea lor pe miezul magnetic.

Similar ca la transformatoarele mici și în cazul transformatoarelor mijlocii și mari, pentru dimensionarea înfășurărilor și ferestrei, sînt necesare următoarele etape:

— se determină înălțimea orientativă a bobinelor (fig. 3.8)

$$H_{B} = L_{c} - 2s_{im} \text{ [mm]}, \tag{3.20}$$

unde s_{im} se ia din tabelul 3.3.

După cum se observă din figura 3.8, distanțele s_{im} și s_{jm}, pot avea valori diferite care se iau din tabelul 3.3, în funcție de tensiunea nominală a fiecărei înfășurări, caz în care înălțimile bobinelor de joasă tensiune (j.t.) și înaltă tensiune (i.t.) diferă între ele ($H_{Bj} > H_{Bi}$), situație întîlnită frecvent cînd

tensiunile înfăşurărilor diferă mult între ele (zeci de kV), sau s_{jm} şi s_{im} se pot lua egale la valoarea lui s_{jm}, cînd bobinele rezultă cu înălţimi egale ;

— pentru dimensiunile stabilite ale conductoarelor izolate, se estimează numărul de spire pe strat şi numărul de straturi, în funcţie de care se determină, cu relaţiile menţionate în continuare pentru fiecare tip de înfăşurare, dimensiunile înfăşurării şi apoi ale ferestrei transformatorului.

În scopul unei corecte conectări a bobinelor din cadrul unei înfăşurări, pentru a se obţine schemele de conexiuni şi grupa de conexiuni impusă, trebuie stabilite convenţiile pentru sensurile de înfăşurare. În figura 3.9 se dau convenţiile pentru sensurile de înfăşurare ale bobinelor faţă de capătul (începutul) acestora, care va forma borna de intrare (vezi şi fig. 1.10).

În continuare, se vor prezenta principalele tipuri constructive de înfăşurări, domeniul lor de aplicare şi modul de determinare al dimensiunilor (înălţimea şi grosimea) acestora.

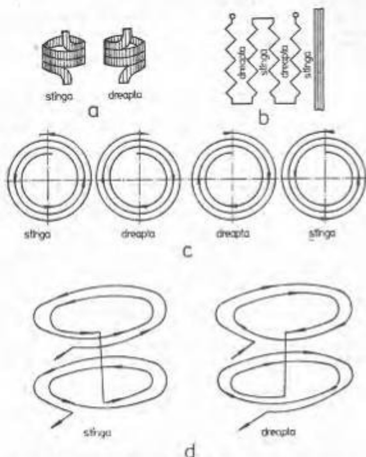


Figura 3.9. Convenţii privind sensurile de bobinare : a — înfăşurare cilindrică într-un strat ; b — înfăşurare stratificată ; c — sensurile la galeţii simpli ; d — sensul la galeţii dubli.

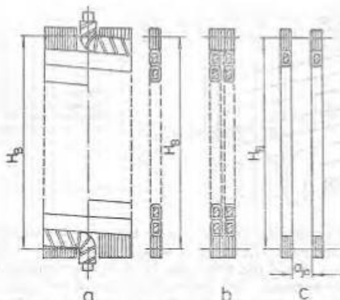


Fig. 3.10. Înfășurarea cilindrică: a — într-un strat; b — în două straturi; c — în două straturi cu canal de răcire a_{jc} între ele.

a. *Înfășurările cilindrice* (fig. 3.10) se utilizează pentru curenți pînă la 800 A și tensiuni sub 1 000 V. Se realizează cu maximum 8 conductoare profilate în paralel. Pentru reducerea pierderilor suplimentare datorită refulării curentului, se recomandă ca depănarea conductorului să se facă pe lat, fără ca latura mică *a* să depășească valorile din tabelul 3.4 (dar, de obicei, sub 4 mm), iar latura mare *b* să nu depășească, în mod normal, 15 mm.

TABELUL 3.4

Dimensiunile radiale orientative ale conductoarelor profilate utilizate la realizarea înfășurărilor cilindrice și stratificate pentru ca factorul k, de majorare a pierderilor în curent alternativ la 50 Hz, în aceste conductoare, să nu depășească anumite valori admisibile.
(Dimensiunile conductoarelor sînt în mm).

Numărul de straturi al înfășurării	Înfășurări de cupru				Înfășurări de aluminiu			
	k, mai mic ca:				k, mai mic ca:			
	1,05	1,10	1,15	1,20	1,05	1,10	1,15	1,20
1	10,0	11,8	12,5	13,2	11,6	13,5	15,6	16,8
2	7,1	8,0	8,5	9,5	8,6	10,0	10,6	11,9
3	5,6	6,3	7,1	7,5	6,4	8,0	9,3	10,0
4	4,75	5,6	6,3	7,1	5,9	6,9	8,0	8,6
5	4,0	5,0	5,6	6,0	5,1	6,4	6,9	7,4
6	3,75	4,75	5,0	5,6	4,7	5,9	6,4	6,9
7	3,55	4,25	4,75	5,0	4,4	5,5	6,0	6,5
8	3,35	4,0	4,5	4,75	4,1	5,1	5,5	6,0
9	3,15	3,75	4,25	4,5	3,8	4,7	5,1	5,5
10	3,0	3,55	4,0	4,25	3,8	4,4	5,1	5,5

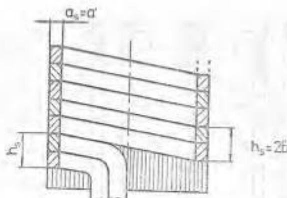


Figura 3.11. Înfăşurare cilindrică cu două conductoare în paralel, suprapuse axial (a' şi b' sînt dimensiunile unui conductor izolat).

Înfăşurările cilindrice cu conductoarele în paralel ale unei căi de curent, aşezate alăturat pe direcţia axială a coloanei (fig. 3.11) se pot realiza într-un strat sau două straturi (fig. 3.10) şi mai rar în trei sau patru straturi.

În vederea asigurării răcirii, fiecare strat trebuie să fie în contact cu agentul de răcire cel puţin pe una din părţi. Lărgimile minime ale canalelor de răcire a_{ja}, se aleg în funcţie de putere şi tensiune între 3 ÷ 8 mm.

Înfăşurările cu conductoarele în paralel ale unei căi de curent aşezate suprapus radial (cu straturile puse în paralel) trebuie prevăzute cu transpoziţii sau *transpuneri* (fig. 3.12). Dacă există *m* conductoare în paralel suprapuse radial, atunci sînt necesare $m - 1$ transpuneri uniform distribuite în lungul înfăşurării (pentru explicaţii privind denumirea şi rolul transpoziţiilor, vezi mai jos la înfăşurările spiralate). În unele cazuri practice, schemele transpunerilor complete din figura 3.12 *a* şi *b* se reduc la schemele *transpunerilor*

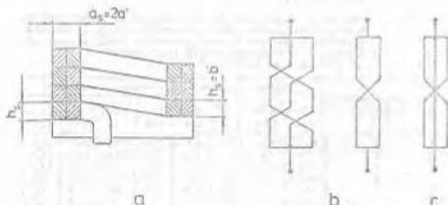


Figura 3.12. Înfăşurare cilindrică cu conductoare în paralel suprapuse radial: a — secţiune printr-o bobină cu două conductoare în paralel; b — schema transpoziţiilor complete pentru trei, respectiv două conductoare în paralel; c — schema transpunerii simplificate pentru trei conductoare în paralel.

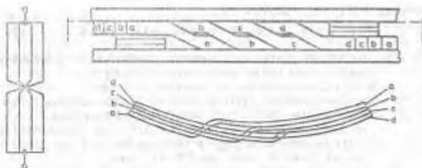


Figura 3.13. Schema și modul de realizare a transpunerii simplificate în cazul a patru conductoare în paralel.

simplificate din figura 3.12 *c* și figura 3.13. În ambele situații pentru fiecare transpoziție se mărește înălțimea bobinei cu cel puțin o înălțime h_s a spirei.

Pentru nivelarea părților frontale ale bobinei, la spirele de capăt ale straturilor se prevăd pene (segmente) circulare pentru egalizare și izolare, pene decupate dintr-un cilindru izolant sau formate din discuri izolante (fig. 3.14). În acest scop, se pot utiliza și rășinile de turnare. Penele de capăt se fixează de spirele marginale ale bobinei cu bandă izolantă.

Înălțimea unei înfășurări cilindrice care are w_s spire pe strat (determinat din condiția obținerii lui H_B în limitele relației (3.20)) este

$$H_B = (w_s + 1)h_s k_z + n_t h_s \quad [\text{mm}], \tag{3.21}$$

unde:

h_s este înălțimea mănunchiului care formează spira (fig. 3.11) și (fig. 3.12);

n_t — numărul transpozițiilor (fig. 3.13);

k_z — 1,01—1,02 factor care ține seama de abaterile efective ale grosimii izolației.

Cînd bobinele se presează, fie înainte de impregnare fie, cele neimpregnate, la montaj, atunci se ia de regulă $k_z = 1$.

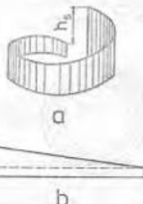


Figura 3.14. Pană (sector) pentru nivelarea capetelor de bobină: a — forma normală; b — desfășurată.

Grosimea înfăşurării cilindrice este

$$a_j = n_s a_s + n_a a_{ja} + (n_s - n_a - 1)\delta_{iz} \text{ [mm]}, \qquad (3.21\ a)$$

unde:

n_s este numărul de straturi de dimensiuni a_s (fig. 3.12), a' fiind grosimea conductorului izolat (vezi relaţia (3.14 *b*));

n_a — numărul canalelor axiale de lăţime a_{ja} alese;

δ_{iz} — grosimea izolaţiei dintre straturi de 1×0,2 mm preşpan pentru tensiuni între straturi sub 150 V şi 2×0,2 mm sau 1×0,5 mm preşpan pentru tensiuni pînă la 500 V. La transformatoarele uscate în clasa de izolaţie *F* şi *H*, se foloseşte ca izolaţie între straturi pînza de sticlă de 0,2—0,3 mm.

În prima fază a dimensionării înfăşurării, se pleacă de la înălţimea aproximativă a înfăşurării care rezultă din înălţimea L_c a coloanei, în funcţie de distanţele de izolare stabilite conform figurii 3.8 şi tabelului 3.3, de la numărul de spire corespunzător unei faze şi de la secţiunea spirei. În baza acestor date globale, se determină dimensiunile conductoarelor pentru una din formele de bobine reprezentate în figura 3.11 sau figura 3.12, cu cerinţele specifice lor.

Sub aspectul realizării, înfăşurarea cilindrică este cea mai simplă şi mai ieftină dintre toate tipurile de înfăşurări utilizate la tensiuni joase.

b. *Înfăşurările spiralate* (v. şi paragraful 1.2.5) sînt specifice curenţilor mari, peste 200 A şi tensiuni pînă la 35 kV.

Înfăşurările spiralate se realizează cu unul sau mai multe începuturi, fiecare început (mănunchi) avînd *m* conductoare profilate în paralel suprapuse radial (fig. 3.15), iar $m \in [1; 12]$. Dimensiunile conductoarelor în mm, sînt cuprinse în domeniile $a \in [2; 4]$, $b \in [8; 16]$, iar secţiunile conductoarelor nu trebuie să depăşească 40—60 mm².

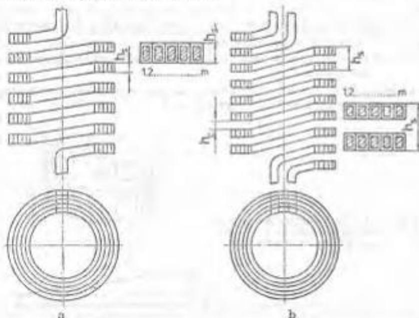


Figura 3.15. Înfăşurări spiralate: a — cu un început; b — cu două începuturi.

Între spire, sau între mănunchiuri care alcătuiesc spira, sînt prevăzute canale radiale h, între 5—8 mm pentru transformatoarele pînă la 630 kVA și între 4—7 mm pentru transformatoarele mai mari ; la transformatoarele cu puteri peste 800 kVA, pentru diminuarea forțelor axiale, se măresc aceste canale, în dreptul galeților de reglaj putînd ajunge pînă la 15—20 mm.

Conductoarele elementare (firele în paralel) fiind suprapuse radial, unul peste altul, vor avea atît lungimi cît și poziții în cîmpul magnetic de scăpări diferite, adică parametrii (rezistențe și reactanțe de scăpări) diferiți. Acest lucru conduce la apariția între firele în paralel, a unui curent de circulație și deci la *pierderi electrice suplimentare* importante.

De aceea, pentru uniformizarea lungimilor și pentru a ocupa fiecare conductor în paralel, succesiv aceeași poziție în cîmpul magnetic de scăpări, ceea ce înseamnează că firele în paralel vor avea aceiași parametrii și deci nu vor mai apare curenții de circulație între ele, sînt necesare *transpoziții sau transpuneri*, adică schimbarea în timpul depanării (bobinării) înfășurării a *ordinei* sau *poziției* firelor în paralel între ele, astfel încît fiecare fir în paralel să ocupe aceeași poziție o anumită înălțime din bobină (aceeași pentru toate firele în paralel).

La înfășurările cu un început, teoretic sînt necesare $m - 1$ transpuneri uniform repartizate pe înălțimea acestora. Deoarece în locurile în care se fac transpozițiile sînt necesare canale mai mari, cum se vede în figura 3.16,

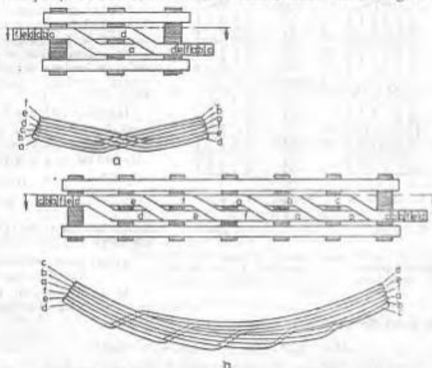


Figura 3.16. Modul de realizare a transpunerilor a înfășurarea spiralală cu un început și șase conductoare în paralel (suprapuse radial) : a — transpuneri pe grupe de conductoare (transpunere de grup) ; b — transpuneri ale tuturor conductoarelor, luate cîte unul (transpunere simplificată sau totală)

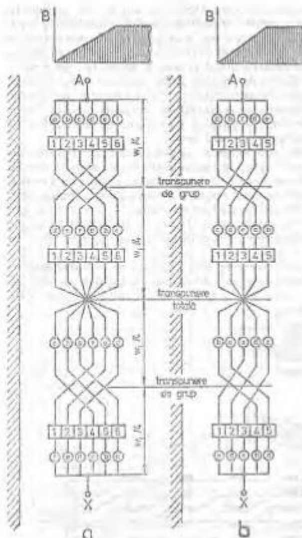


Figura 3.17. Schema pentru transpuneri simplificate la înfășurările spiralate cu un început: a — cu număr par de conductoare; b — cu număr impar de conductoare.

În practică se utilizează un sistem simplificat, cu transpoziții numai în trei locuri (fig. 3.17). În două locuri, la 1/4 și la 3/4 din numărul total de spire se fac *transpoziții (transpuneri) de grup* iar la mijloc, o transpunere a tuturor conductoarelor, luate cite unul, numită *transpunere simplificată* sau *totală*. Schema transpunerilor este corect realizată dacă suma pozițiilor pe care le ocupă un conductor este aceeași pentru toate conductoarele din cadrul mănunchiului. Astfel, pentru conductoarele din figura 3.17, a, suma este 14 (conductorul a : 1+4+3+6=14), iar pentru cele din figura 3.17, b, este 12 (conductorul a : 1+4+2+5=12). Aceeași sumă se găsește, în ambele cazuri și pentru celelalte conductoare: b, c, d etc.

Înălțimea înfășurării spiralate cu un început este

$$H_B = b'(w_1 + 1 + n_t) + k_t h_c (w_1 + n_t) \quad [\text{mm}] \qquad (3.22)$$

unde, în afara notațiilor cunoscute:

n_t este numărul locurilor transpozițiilor;

k_t = 0,94—0,95, este factorul de tasare.

În cazul din figura 3.17, $n_t = 3$ și relația (3.22) devine

$$H_B = b'(w_1 + 4) + k_t h_c (w_1 + 3) \quad [\text{mm}]. \qquad (3.22\ a)$$

La înfășurările cu două începuturi, teoretic sînt necesare $2m - 1$ transpoziții uniforme repartizate în lungul înfășurării.

Numărul transpozițiilor se poate reduce la $m - 1$ dacă se fac transpunerile duble. În figura 3.18 se arată poziția conductoarelor transpuse la o înfă-

șurare cu $2m=8$ conductoare în paralel și modul cum se realizează transpunerile simple și duble.

Transpunerile fiind uniform repartizate în lungul înfășurării, dacă numărul de spire w_i este divizibil la numărul m de conductoare în paralel suprapuse radial, atunci transpunerile se plasează pe o generatoare a cilindrului. În caz contrar, ele se plasează pe o elicoidă.

Trebuie menționat că înfășurările cu două începuturi nu necesită spații suplimentare între spire în locurile unde se fac transpunerile.

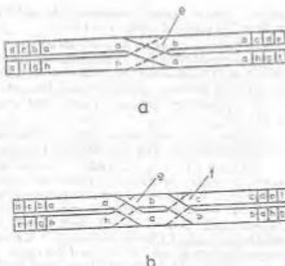


Figura 3.18. Înfășurarea dublu spiralată: a — cu transpunere simplă; b — cu transpunere dublă.

Înălțimea înfășurărilor dublu spiralate, cînd se lasă canal atît între mănunchiurile spirei cît și între spire (fig. 3.15 b) este

$$H_B = 2b'(w_i + 1) + k_i h_c (2w_i + 1) \quad [\text{mm}], \tag{3.23}$$

iar cînd se lasă canal numai între spire (cele două mănunchiuri fiind alăturate)

$$H_B = 2b'(w_i + 1) + k_i h_c w_i \quad [\text{mm}]. \tag{3.23, a}$$

Grosimea înfășurărilor spiralate cu m conductoare suprapuse radial este

$$a_j = ma' \quad [\text{mm}]. \tag{3.23, b}$$

În prima etapă a dimensionării înfășurării, numărul de începuturi al acesteia se estimează în funcție de b' rezultat din relația (3.22 a), în care se ia $k_i = 1$ și H_B dat (estimat din L_e și distanțele de izolare — vezi relația (3.20)), stabilite conform figurii 3.8 și tabelului 3.3

$$b' = \frac{H_B}{w_i + 4} - h_c \frac{w_i + 3}{w_i + 4} \quad [\text{mm}]. \tag{3.24}$$

Dacă $b' \leq 15$ mm, se alege înfășurarea simplu spiralată — cu un început, iar dacă $15 \leq b' \leq 35$ mm se alege înfășurare dublu spiralată — cu două începuturi.

Înfășurările spiralate au rezistență mecanică bună, la puteri mari putîndu-se executa ușor și rărirea spirelor pentru realizarea canalelor. Răcirea este de asemenea bună.

Utilizarea înfășurărilor spiralate ca înfășurări de înaltă tensiune, nu este potrivită, datorită dificultăților care apar la efectuarea lipiturilor necesare

prizelor pentru reglarea tensiunii şi la stabilirea valorilor treptelor de reglaj impuse, numărul de spire fiind mic.

În privința prețului de cost, înfăşurarea spiralată este mai scumpă decît înfăşurarea cilindrică cu conductoare în paralel, datorită manoperei necesare realizării transpunerilor şi pentru distanţarea spirelor între ele. Totodată factorul de umplere a ferestrei este mai mic.

c. *Înfăşurările continue, în galeţi* sînt specifice tensiunilor ridicate, peste 3 kV.

Înfăşurările continue se realizează din conductoare la care dimensiunile conductoarelor, în mm, sînt cuprinse în domeniile $a \in [1,2; 3]$ şi $b \in [12;18]$.

În figura 3.19 se indică stadiile succesive de realizare a unei înfăşurări continue, în galeţi. Capătul A se fixează de cadrul pe care se realizează bobina, iar capătul X vine de la tamburul pe care este înfăşurat conductorul. Se depănă, de exemplu, 6 spire suprapuse (poziţia *a*) care constituie un *galet normal*, apoi, în mod analog, încă 6 spire alăturat (poziţia *b*). Se opreşte maşina de bobinat şi se fixează capătul X (poziţia *c*), apoi se mută spirele una peste alta cum se arată la poziţia *d* din figura 3.19 pînă se ajunge la situaţia *e*. Se trage galetul lîngă celălalt, la distanţa impusă de distanţier cu grosimea h_c (situaţia *f*) realizîndu-se astfel *galetul răsturnat*, apoi se continuă depănarea cu spirele următoare realizînd un nou galet normal, după care se repetă operaţiunile descrise mai înainte pentru realizarea celui de al doilea galet răsturnat ş.a.m.d.

Înfăşurarea astfel obţinută cuprinde bobine în formă de disc, numite *galeţi*, care au trecerile consecutiv în interior, respectiv în exterior, fără a tăia con-

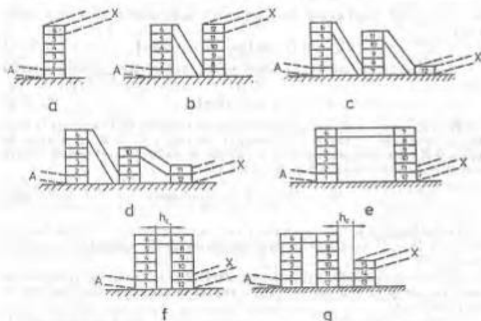


Figura 3.19. Stadiile succesive la realizarea unei înfăşurări continue, în galeţi.

ductorul și eliminîndu-se lipiturile, de unde și denumirea de *înfășurare continuă*.

Galeții înfășurărilor continue se pot realiza cu un număr întreg sau fracționar de spire, număr care poate diferi la galeții aceleiași înfășurări, cu condiția ca diametrul exterior al galeților să fie practic același. Astfel, galeții de intrare de la înfășurările cu tensiuni nominale peste 15 kV, galeți care conțin 3—10% din numărul de spire, se execută cu izolație întărită și, pentru a păstra același diametru cu galeții mijlocii, vor trebui să aibă un număr de spire mai mic.

Canalele radiale h_c dintre galeți, se aleg în limitele 4—8 mm, valorile mai mari fiind pentru transformatoare mai mici. Canalele radiale h_c se pot lăsa și din doi în doi galeți, dacă răcirea este asigurată (fig. 3.20).

În cazul curenților mai mari și tensiuni ridicate, cînd nu se poate realiza o înfășurare spiralată din cauza numărului mare de spire, se pot realiza înfășurări continue în galeți, cu pînă la 4 conductoare în paralel suprapuse radial. La realizarea unei asemenea înfășurări care necesită transpoziții, transpunerile se fac, în locurile de trecere de la un galet la altul, cum se vede în figura 3.21.

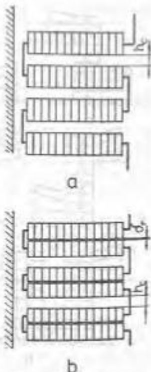


Figura 3.20. Scheme de principiu pentru așezarea galeților la înfășurările continue: a — cu canal după fiecare galet; b — cu canal după fiecare doi galeți, aceștia fiind izolați între ei prin rondele de preșpan cu grosimea δ_r.

Înălțimea bobinelor la înfășurările cu canale radiale între toți galeții (fig. 3.20 a), este:

$$H_B = n_g b' + k_i h_c (n_g - 1) \quad [\text{mm}], \qquad (3.25)$$

iar la înfășurările cu canale din 2 în 2 galeți (fig. 3.20 b) este

$$H_B = n_g b' + k_i h_c \left(\frac{n_g}{2} - 1\right) + \frac{n_g}{2} \delta_r \quad [\text{mm}]. \qquad (3.25\text{ a})$$

Grosimea înfășurărilor continue este

$$a_i = n_s n_p a' \quad [\text{mm}], \qquad (3.26)$$

în care:

n_g este numărul de galeți de pe o coloană;
n_s — numărul maxim de spire al unui galet;
δ_r — grosimea discurilor izolate dintre doi galeți alăturați (fig. 3.20 b), în mm;
n_p — numărul de conductoare în paralel, dacă este cazul (factorul de tasare k_i = 0,94—0,96, are aceleași valori ca în relațiile (3.22) și (3.22 a)).

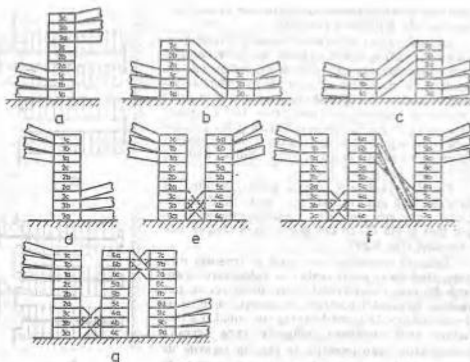


Figura 3.21. Stadiile de realizare a unei înfăşurări continue, în galeţi, cu trei conductoare în paralel (se observă şi realizarea transpoziţiilor).

Izolaţia dintre galeţii alăturaţi se realizează din minimum două rondele a căror grosime să fie cel puţin 0,5 mm fiecare.

Canalele radiale h_r pot avea valori diferite, 6—8 mm la extremităţile bobinei şi 4—7 mm la mijloc; rezultă că la calculul înălţimii bobinei, cu relaţia (3.25) sau (3.25 *a*) se va avea în vedere acest lucru, luîndu-se separat înălţimea tuturor canalelor.

În prima etapă, numărul orientativ de galeţi se determină, după caz, din relaţiile (3.25) şi (3.25 *a*) şi anume

$$n_g = \frac{H_b + k_r h_r}{b' + k_r h_r} \qquad (3.27)$$

sau

$$n_g = \frac{2(H_b + k_r h_r)}{2b' + k_r h_r + \delta_r}, \qquad (3.27\ a)$$

în care H_B se estimează iniţial din relaţia (3.20), cu distanţele de izolare stabilite conform figurii 3.8 şi tabelului 3.3, iar valorile pentru celelalte elemente, se aleg în limitele indicate mai sus.

Numărul mediu de spire al galeţilor se estimează luînd ca bază numărul de spire pe fază w_1,

$$w_g = \frac{w_1}{n_g}. \qquad (3.28)$$

La definitivarea numărului de galeţi şi al numărului de spire pentru fiecare tip de galet, trebuie respectate următoarele condiţii:

a) spirele de reglaj şi spirele cu izolaţie întărită trebuie aşezate în galeţi separaţi;

b) pe o coloană se pot găsi trei tipuri de galeţi: de capăt, normali sau mijlocii şi de reglaj. Numărul galeţilor normali şi de capăt trebuie să fie cu soţ, iar cel al galeţilor de reglaj, ideal ar trebui să fie un multiplu de patru pentru o scoatere uşoară a prizelor;

c) numărul de spire corespunzător unui galet poate fi întreg sau fracţionar. Cînd numărul este fracţionar, numitorul fracţiei trebuie să fie egal cu numărul distanţoarelor, pentru înlăturarea erorilor la obţinerea numărului total de spire (dacă sînt 16 distanţoare şi 7 1/4 spire pe galet, se vor trece 7 4/16 spire, pentru ca bobinatorul, după înfăşurarea celor 7 spire, să mai înfăşoare conductorul pînă la distanţorul al patrulea);

d) dimensiunile radiale ale galeţilor să nu difere; galeţii cu spire mai puţine, dacă nu au aceeaşi grosime, vor fi aduşi la aceeaşi grosime fie printr-un suport la bază, fie prin introducerea unor benzi de carton între spire, cum se arată la înfăşurările secţionate;

e) pentru repartizarea mai uşoară a spirelor între galeţi, dimensiunile canalelor radiale dintre galeţi, se pot lua cu 10—30% mai mari decît limitele minime indicate mai sus.

Înfăşurarea continuă necesită mai multă manoperă şi este mai costisitoare decît înfăşurarea cilindrică echivalentă. Dar, datorită rezistenţei mecanice mari a comodităţii realizării prizelor de reglaj, a lipsei lipiturilor între galeţi şi a simplităţii consolidării axiale şi radiale, înfăşurarea continuă este utilizată pe scară largă ca înfăşurare de înaltă tensiune la transformatoarele cu puterea pe o coloană de la 60 kVA în sus şi pentru tensiuni peste 3 kV, fără limită superioară.

Cînd înfăşurarea continuă este utilizată ca înfăşurarea de joasă tensiune, la transformatoarele cu puterea mai mare de 800 kVA, se poate realiza foarte simplu rărirea spirelor în dreptul galeţilor de reglaj de pe înalta tensiune, prin mărirea canalelor radiale pînă la 15—20 mm.

d. *Înfăşurările secţionale*, numite şi *înfăşurări în galeţi*, sînt utilizate ca înfăşurări de înaltă tensiune, pînă la 60 kV. Ele se realizează din conductoare rotunde cu diametre cuprinse între 0,5 şi 3 mm, sau din conductoare profilate, cu secţiuni de la 8 la 16 mm² şi de formă apropiată de un pătrat. La aceste înfăşurări nu se utilizează conductoare în paralel.

Înfăşurările secţionate pot fi depănate în acelaşi sens (fig. 3.22), trecerea de la ultimul strat al unui galet la primul strat al următorului făcîndu-se prin spaţiul dintre galeţi.

Pentru simplificarea legăturilor între galeţi şi asigurarea unei izolaţii mai bune, se execută galeţi dubli denumiţi şi *galeţi jumelaţi*, adică perechi de cîte doi galeţi alăturaţi, din care unul este înfăşurat la dreapta iar altul la stînga (fig. 3.23 şi fig. 3.24). Cei doi galeţi, unitari, care formează galetul dublu, pot diferi prin numărul de spire, prin izolaţia spirelor, izolaţia dintre straturi şi, în unele cazuri, chiar prin secţiunea conductoarelor. Cu toate acestea, diametrul exterior trebuie să fie practic acelaşi la toţi galeţii, la galeţii mai subţiri

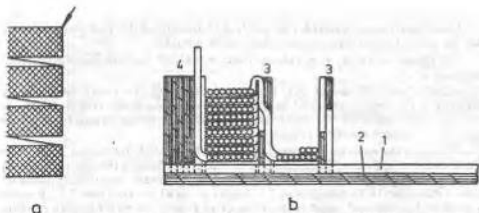


Figura 3.22. Înfăşurarea în galeţi depănaţi în acelaşi sens (galeţi simpli); a — schema de legare a galeţilor; b — trecerea (la execuţie) de la un galet la altul.

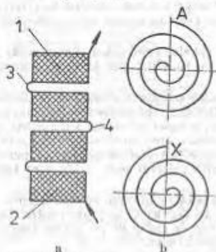


Figura 3.23. Schema de legare a galeţilor dubli (jumelaţi) (a) şi sensul lor de depănare (b): 1, 2 — galeţi jumelaţi; 3 — legătura interioară; 4 — legătura exterioară.

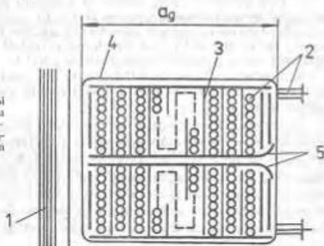


Figura 3.24 Secţiune prin doi galeţi jumelaţi: 1 — cilindru izolant; 2 — conductor; 3 — izolaţie între straturi; 4 — izolaţia galetului; 5 — izolaţia între galeţii jumelaţi.

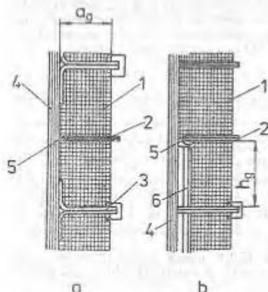


Figura 3.25. Înfășurarea secționată (în galeți) depănată direct pe cilindru izolant: a — cu galeți de aceeași dimensiune radială (grosime); b — cu galeți de dimensiuni radiale diferite; 1 — galet; 2 — disc izolant; 3 — disc izolant răsfrînt; 4 — cilindru izolant; 5 — legătură interioară; 6 — suport de compensare.

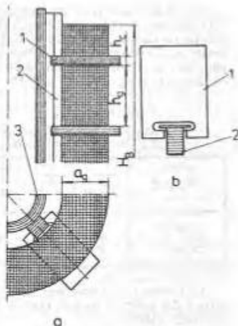


Figura 3.26. Așezarea distanțoarelor la înfășurările secționate (în galeți): a — secțiune longitudinală și transversală; b — modul de prindere a distanțoarelor cu penele respective; 1 — distanțor; 2 — pană; 3 — cilindru izolant.

crescîndu-se diametrul interior prin suporți de compensare (fig. 3.25 b — poziția 6), din material electroizolant.

Galeții sînt separați între ei prin discuri izolante (fig. 3.25) sau distanțoare care asigură canale radiale (fig. 3.26).

Conductoarele se bobinează direct pe cilindrii izolanți sau pe pene, permițînd circulația fluidului de răcire prin canalele formate. Modul de execuție al galeților dubli este, în principiu, similar cu cel al galeților de la înfășurarea continuă. Legăturile interioare se realizează la depănare, iar legăturile exterioare se execută după montarea galeților.

Numărul de galeți în care trebuie divizată înfășurarea se determină, ținînd seama de solicitările termice, de tensiunea nominală care revine unui galet și de rezistența mecanică la acțiunea forțelor electrodinamice axiale. Astfel, pentru asigurarea răcirii la o grosime radială a galetului de 30—35 mm, înălțimea lui nu trebuie să depășească 30—35 mm. Sub aspectul tensiunilor de lucru, se recomandă ca tensiunea între două straturi a galeților să nu depășească 200—400 V. Rezistența mecanică este foarte bună la galeții realizați cu conductor dreptunghiular; la cei realizați cu conductor rotund, aceasta scade pe măsură ce diametrul conductorului depășește 2 mm și se impune limitarea înălțimii galetului la 30—40 mm.

Valori informative privind numărul galeților se dau, în funcție de puterea și tensiunea de fază a transformatorului, în tabelul 3.5. Distanțele dintre galeți, funcție de puterea și nivelul de izolație al înfășurărilor, se iau între aceleași limite ca și canalele h_c de la înfășurarea continuă, iar izolația între straturile galeților, se ia din folie izolantă cu grosimea de 0,4—0,5 mm, pentru galeții de la capete și cu grosimea de 0,15—0,25 mm pentru galeții mijlocii.

TABELUL 3.5

Numărul orientativ de galeți realizați din conductoare rotunde, în funcție de puterea și tensiunea transformatorului.

U_{fN} [kV]	S_N [kVA]						
	20–50	75–125	160–200	250–315	400–500	630–800	1 000–1 600
6 și 10	2	2–6	2–8	10	12	14	16
15 și 20	2	2–8	2–10	12	14	16	18
30 și 35	8	10	12	14	16	18	20

La tensiuni nominale mai mari de 15 kV, primii doi galeți de intrare și ultimii doi galeți ai fiecărei faze, se execută cu izolația spirelor și cea dintre straturi, întărită.

Avînd estimat numărul galeților, se determină partea din înălțimea bobinei ocupată de canalele radiale și de grosimile discurilor izolante, dintre galeți (fig. 3.25 și fig. 3,26)

$$h_{iz} = \Sigma h_c + \Sigma \delta_r \quad [\text{mm}], \tag{3.29}$$

unde, lățimea canalelor h_c dintre galeți se ia în limitele 4—8 mm, ca la înfășurarea continuă, iar grosimile δ_r ale discurilor sau rondelelor izolante se iau de 1—2 mm (2 × 0,5+4 × 0,5 mm).

Înălțimea orientativă a tuturor galeților, este

$$\Sigma h_g' = H_B - h_{iz} \quad [\text{mm}], \tag{3.30}$$

iar înălțimea medie a unui galet,

$$h_g = \frac{\Sigma h_g'}{n_g} \quad [\text{mm}]. \tag{3.30, a}$$

În acest caz, avînd w_f spire pe fază, numărul orientativ de spire al unui galet se determină cu relația (3.28).

Avînd înălțimea galetului și diametrul izolat d' (sau înălțimea b') a conductorului, se poate estima numărul de straturi n_s, cu ajutorul cărora se definitivează repartiția spirelor pe galeți, fără a se realiza mai mult de 4 tipuri de galeți. Înălțimea definitivă a galetului va fi deci

$$h_g = (w_s + 1)d' \quad [\text{mm}], \tag{3.31}$$

iar cea a înfășurării

$$H_B = h_g + k_i \Sigma h_c + \Sigma \delta_r \quad [\text{mm}], \tag{3.31 a}$$

unde, w_s este numărul de spire pe un strat al galetului.

Lățimile h_c ale canalelor radiale se aleg în limitele indicate mai sus, rotunjindu-se pentru a se obține înălțimea totală a înfășurării de înaltă tensiune egală cu cea a înfășurării de joasă tensiune.

Grosimea galetului se determină cu relația

$$a_g = n_r d' + (n_r - 1)\delta, \quad [\text{mm}], \tag{3.32}$$

unde, grosimea izolației dintre straturi δ, se ia de 0,4—0,5 mm la galeții de capăt (sus și jos), de 0,3 mm la galeții vecini celor de capăt și de 0,12—0,15 mm la cei mijlocii.

Înfășurările în galeți dubli au rezistență mecanică și răcire bună, dar tehnologia de fabricație este complicată și conduc la o umplere proastă a ferestrei, mai ales cînd sînt canale radiale între toți galeții. Domeniul de aplicare este limitat numai de dimensiunile conductoarelor.

Înfășurările în galeți simpli (înfășurați în același sens) sînt mai simple, dar legăturile de trecere dintre galeții vecini pot conduce în exploatare la scurtcircuite.

e. *Înfășurările stratificate* sau în mai multe straturi sînt utilizate la transformatoarele de putere cu tensiuni peste 1 kV. Ele se realizează din conductoare rotunde, cu diametrul pînă la 3—3,5 mm, sau din conductoare profilate cu secțiuni pînă la 30 mm² (fig. 3.27).

Înfășurările stratificate se pot realiza și cu 2—4 conductoare în paralel, așezate alăturat în direcția axială, dar straturile sînt conectate numai în serie.

Între straturile înfășurării care are w_s spire pe strat, se adaugă folie de materiale electroizolante corespunzătoare claselor de izolație, avîndu-se în vedere tensiunea dintre straturi dată de relația

$$U_s = 2w_s e_1 \quad [\text{V}]. \tag{3.33}$$

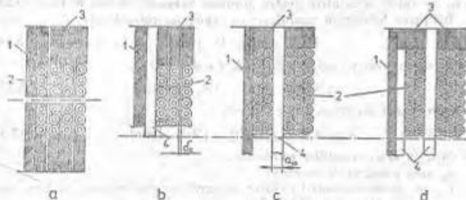


Figura 3.27. Înfășurările stratificate: a — depănată direct pe cilindru; b — depănată pe pene care asigură canal axial; c — depănată pe cilindru și cu canal axial de răcire interior; d — depănată pe pene și cu canal axial de răcire interior; 1 — cilindru izolant; 2 — izolație între straturi; 3 — piese de egalizare; 4 — pene pentru realizarea canalelor axiale.

În funcție de această tensiune, se stabilește atît grosimea izolației dintre spire, cît și lungimea cu care izolația trebuie să depășească bobina pentru înlăturarea conturnărilor (tabelul 3.6). La transformatoarele uscate se utilizează ca izolație între straturi pînza de sticlă de 0,2—0,3 mm.

TABELUL 3.6

Izolația cu hîrtie de 0,12 mm între straturi, pentru înfășurările stratificate (pentru alte grosimi ale hîrtiei se variază numărul de straturi, astfel încît să se respecte grosimea izolației dintre straturi).

Tensiunea normală între două straturi [V]	Grosimea izolației dintre straturi [mm]	Depășirea capătului bobinei de către izolația dintre straturi [mm]
<1 000	2×0,12	1,0
1 000 – 2 000	3×0,12	1,6
2 001 – 3 000	4×0,12	1,8
3 001 – 3 500	5×0,12	1,6
3 501 – 4 000	6×0,12	2,2
4 001 – 4 500	7×0,12	2,2
4 501 – 5 000	8×0,12	2,2
5 001 – 5 500	9×0,12	2,2

Notă. Pentru transformatoarele cu puteri mai mari de 1 000 kVA, izolația între straturi se alege tot din acest tabel, dar nu se ia mai puțin de 6 × 0,12 mm, iar depășirea izolației de capăt nu se ia mai mică de 2 mm, chiar dacă tensiunile dintre straturi sînt mai mici.

Pentru îmbunătățirea condițiilor de răcire, se folosesc canale axiale care divizează înfășurarea în două părți, partea interioară avînd în jurul a 1/3 pînă la 2/5 din numărul total de straturi.

Lățimea canalelor pentru o răcire bună se ia între 4—7 mm pentru canale cu lungime pînă la 1 m și între 6—10 mm cînd canalele sînt mai lungi de 1 m, iar valori orientative pentru grosimea bobinelor se dau în figura 3.28.

Înălțimea înfășurării stratificate cu conductor rotund, este

$$H_B = d'(w_s + 1) \quad [\text{mm}], \tag{3.34}$$

iar grosimea, pentru cazul din figura 3.27 *a* și *b* este

$$a_i = n_s d' + (n_s - 1)\delta_s, \quad [\text{mm}] \tag{3.35}$$

și pentru cazul din figura 3.27 *c* și *d* este:

$$a_i = n_s d' + a_{ia} + (n_s - 2)\delta_s, \quad [\text{mm}], \tag{3.35 a}$$

în care, în afara notațiilor cunoscute:

n_s este numărul de straturi;

δ_s — grosimea izolației dintre straturile de conductoare, în mm, care se alege din tabelul 3.6.

În cazul înfășurărilor cu conductor profilat, dimensiunile bobinelor se determină tot cu relațiile (3.34), (3.35) și (3.35 a), cu singura deosebire că diametrul d' al conductorului izolat se înlocuiește, după caz, cu dimensiunile conductorului profilat a' (pentru grosime) și b' (pentru înălțime).

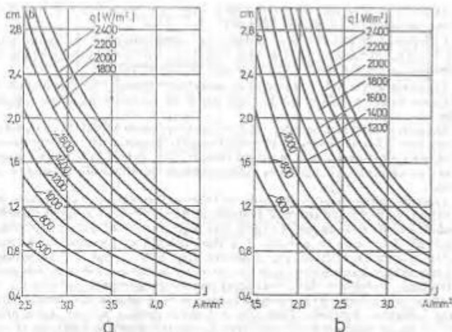


Figura 3.28. Grosimile orientative ale bobinelor din conductoare profilate, funcție de densitatea de curent din conductor, pentru diferite valori ale densității de suprafață q, date de pierderile produse in acele bobine: a — conductoare de cupru; b — conductoare de aluminiu.

La înfășurările prevăzute cu ecran, dimensiunea radială a înfășurării se mărește cu o grosime care poate fi între 0,5—1 mm.

Luind înălțimea bobinei egală sau mai mică cu a înfășurării de joasă tensiune, se determină numărul de spire pe strat $w_s = \frac{H_B}{d'} - 1$. Dacă sint utilizate conductoare profilate, atunci se înlocuiește d' cu b'.

Numărul de straturi $n_s \approx \frac{w_i}{w_s}$, se rotunjește prin adaus la un număr întreg; se determină din nou $w_s = \frac{w_i}{n_s}$ și apoi $H_B l = (w_s + 1)d'$. Se admit și situații cînd pe ultimul sau ultimele două trei straturi numărul de spire este mai mic, dar spirele vor fi așezate simetric față de mijlocul bobinei.

Înfășurările stratificate sint utilizate curent atît la transformatoarele de mică putere cu spire multe și de secțiune mică, cît și la înfășurările de înaltă tensiune ale transformatoarelor mari, limitarea fiind impusă de rezistența mecanică la forțele electrodinamice axiale de scurtcircuit.

Înfășurările stratificate realizate cu conductor rotund se limitează la transformatoarele cu puteri pe o coloană pînă la 200 kVA. La puteri mai mari, se utilizează conductoare profilate.

Înfășurările stratificate se comportă bine la impulsurile de tensiune, avînd o repartiție inițială a gradientului de potențial destul de bună [3], [5].

Infășurarea stratificată este simplă și implică o manoperă mai redusă în raport cu celelalte tipuri de înfășurări.

f. *Infășurările din folie* sînt utilizate la transformatoare cu puteri pînă la 2 500 kVA și tensiuni pînă la 10—15 kV. Se utilizează în special folia de aluminiu, cu grosimi de la 0,025 la 2 mm (STAS 5681-74).

Infășurările din folie se pot realiza monobloc, lățimea foliei fiind egală cu înălțimea totală a înfășurării sau din galeți cu înălțimea egală cu lățimea foliei.

Divizarea înfășurării în galeți este impusă de valoarea curentului, respectiv, de grosimea foliei, de tensiunea pe spiră, respectiv de modul de izolație și uneori de repartiția temperaturilor în lungul înfășurărilor, datorită repartiției neuniforme a curentului pe înălțimea foliei, produsă de cîmpurile magnetice de scăpări.

Izolarea spirelor (între straturile de folie) se face cu hîrtie (telefonică sau de cablu), cu lacuri sau cu oxizi. Izolarea cu hîrtie este mai simplă înlăturînd posibilitățile de străpungere la capete prin depășirea lățimii foliei cu 3—5 mm (fig. 3.29) între care se prevede și o fîșie izolantă cu grosimea cît a foliei, pentru asigurarea înălțimii H_B a bobinei (fig. 3.29 — poz. 3). În schimb, la foliile subțiri, acest sistem de izolare conduce la un factor de umplere prost al ferestrei. Izolarea cu lacuri sau oxizi impune ca marginile foliei să fie rotunjite și bine izolate, iar executarea bobinelor să se facă cu mai mare atenție. După executarea bobinelor, indiferent de izolarea spirelor, acestea sînt impregnate cu un lac epoxidic care definitivează, izolația capetelor bobinelor și consolidează bobina.

Realizarea înfășurărilor din folie nu necesită instalații speciale în atelierele de bobinaj.

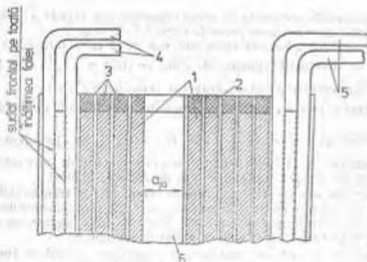


Figura 3.29. Infășurare cilindrică stratificată din folie de aluminiu: 1 — folia; 2 — izolația de hîrtie dintre straturi; 3 — izolație egalizare; 4 — bare de ieșire (interioare); 5 — bare de ieșire (exterioare); 6 — canal de răcire.

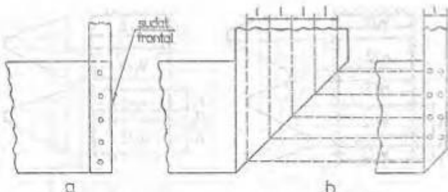


Figura 3.30. Forme de realizare a capetelor (ieșirilor) înfășurărilor din folie: a — cu cîte două bare de aluminiu între care se sudează frontal folia; b — prin îndoirea succesivă a foliei și sudare prin puncte.

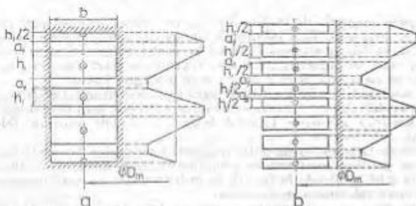


Figura 3.31. Înfășurări alternate simetrice și formele corespunzătoare de variație a cîmpului magnetic de scăpări: a — cu bobine întregi; b — cu bobine secționate și canale de răcire a_{ii} sau a_{ij} între ele.

Înfășurările din folie sînt rezistente din punct de vedere mecanic și se răcesc bine. Bornele bobinei din folie sînt scoase cel mai frecvent prin două bare între care se găsește folia sudată frontal pe toată înălțimea ei (fig. 3.29 și fig. 3.30 a) sau prin îndoirea succesivă a foliei și apoi, ieșirea, sudată prin puncte (fig. 3.30 b).

g. *Înfășurările alternate*, numite și înfășurări cu galeți alternați, sînt utilizate atunci cînd se urmărește o tensiune de scurtcircuit mică și o diminuare a forțelor axiale. Acest tip de înfășurare se mai utilizează la transformatoarele în manta și la transformatoarele răcite cu aer, cu coloane orizontale.

La înfășurările alternate, porțiuni din înfășurarea de joasă tensiune alternează cu porțiuni din cea de înaltă tensiune (fig. 3.31 și fig. 3.32). În cazul figurii 3.31, solenațiile galeților de joasă tensiune sînt egale cu cele ale galeților de înaltă tensiune, galeții de capăt avînd cîte o jumătate din solenația galeților principali pentru a forma *înfășurări alternate simetrice*, cu o repartiție simetrică

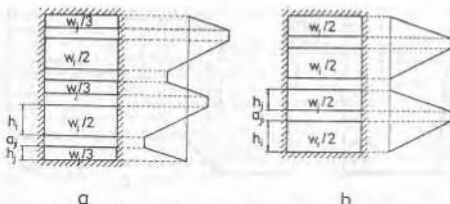


Figura 3.32. Înfăşurări alternate nesimetric şi formele corespunzătoare de variaţie a cîmpului magnetic de scăpări: a — joasă tensiune cu un galet mai mult decît înalta tensiune; b — joasa şi înalta tensiune cu acelaşi număr de galeţi.

a cîmpului magnetic de scăpări. Uneori, în vederea îmbunătăţirii răcirii, galeţii se divid astfel încît întreaga înfăşurare este constituită din semigaleţi (fig. 3.31, b). Cîmpul magnetic fiind nul în canalul dintre semigaleţi, prezenţa acestui canal nu influenţează valoarea tensiunii de scurtcircuit care se calculează cu aceeaşi relaţie ca şi pentru cazul din figura 3.31 a.

În cazul din figura 3.32, galeţii de înaltă tensiune sînt egali între ei şi alternează cu galeţii de joasă tensiune care sînt, de asemenea, egali între ei, dar fără a se simetriza solenaţiile formînd *înfăşurări alternate nesimetric*, folosite mai rar.

Bobinele înfăşurărilor de înaltă tensiune se pot realiza din conductori rotunzi sau profilaţi, sub formă de galeţi jumelaţi sau secţiuni de bobine continue în galeţi. Bobinele înfăşurării de înaltă tensiune se leagă de obicei în serie pentru înlăturarea nesimetriilor.

Înfăşurarea de joasă tensiune se formează din secţiuni de înfăşurări spiralate sau de înfăşurări continue în galeţi legate în paralel sau serie-paralel.

Luînd cazul înfăşurărilor alternate simetric — cazul utilizat în practică — în baza definiţiei lor se poate scrie relaţia solenaţiilor

$$\frac{1}{2} w_i I_i = w_j I_{jc} = \frac{1}{2} w_j I_j, \tag{3.36}$$

notaţiile fiind cele din figura 3.33.

Din relaţia (3.36) rezultă

$$I_{jc} = \frac{1}{2} I_i \frac{w_i}{w_j} = \frac{1}{2} I_j \quad [A] \tag{3.36, a}$$

adică, valoarea curentului I_{jc} al galetului de capăt este egală cu jumătate din valoarea curentului I_j al galeţilor intermediari. Şi, în ipoteza unor densităţi egale de curent, secţiunile conductoarelor vor fi în acelaşi raport.

În concluzie *tipul constructiv de înfăşurare* se alege în funcţie de cerinţele de exploatare şi de producţie pentru întregul transformator. Totodată, la toate tipurile de înfăşurări examinate s-au indicat şi limitele uzuale de utilizare

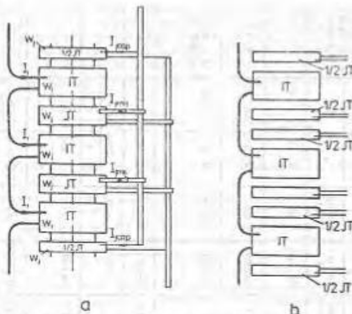


Figura 3.33. Repartiția curenților la înfășurările alternate simetric: a — cu jumătăți de galeți (de joasă tensiune) la capete; b — cu galeți de joasă tensiune egali.

a acestora în funcție de puterea pe coloană, de secțiunea spirei, respectiv de curentul de fază și de tensiunea înfășurării. O recapitulare a domeniilor de aplicare a tipurilor de înfășurări utilizate la transformatoarele de putere, este dată în tabelul 3.7.

Dacă transformatorul prezintă particularitatea de a avea solicitări mecanice, electrice sau termice ridicate, tipul constructiv de înfășurări adoptat trebuie să prezinte avantaje mai mari în acea privință.

La alegerea, apoi dimensionarea înfășurării, trebuie să se aibă în vedere posibilitățile de transmisie a căldurii de la înfășurare la agentul de răcire. De aceea, după dimensionarea bobinelor, trebuie să se verifice densitatea de suprafață q a pierderilor, adică pierderile din înfășurare disipate pe unitatea de suprafață de răcire a bobinei, măsurate în W/m². La transformatoarele cu circulația naturală a uleiului, densitatea de suprafață a pierderilor trebuie să nu depășească valorile q = 1 200—1 400 W/m², iar la cele cu circulație forțată, q = 2 000—2 200 W/m². La transformatoarele uscate, valorile lui q depind de clasa de izolație a transformatorului și de lărgimea canalelor de răcire; pentru clasa de izolație F se admite q = 300—700 W/m².

Schema de reglaj a tensiunii transformatorului contribuie și ea în mare măsură la alegerea tipului constructiv al înfășurării, mai ales atunci cînd pot apare forțe axiale de scurtcircuit periculoase [4].

Avînd determinate numerele de spire și secțiunile căilor de curent și cunoscînd condițiile de realizare ale diferitelor tipuri de înfășurări, în baza tabelului 3.7 se poate alege, într-o primă etapă, cîte un tip de înfășurare pentru joasa și înalta tensiune.

TABELUL 3.1

Sinteza tipurilor de înfășurări ale transformatoarelor de putere, cu referiri la posibilitatea lor de aplicare

Nr. crt.	Tip înfășurare	Avantaje	Dezavantaje	Utilizare		Limite de aplicare		Dimensiuni conductoare [mm]		Număr maxim de conductoare în paralel
				preferată	posibilă	curenți [A]	tensiuni [kV]	a	b	
1	Cilindrică	Tehnologie simplă; Răcire bună	Rigiditate mecanică redusă	JT	IT	60–800	≤1	4–10	6–15	4
2	Tip Brusch	Tehnologie simplă; Răcire bună	Rigiditate mecanică redusă	JT	IT	≤1 000	≤35	2–3	12–18	4–16
3	Spiralată	Rigiditate mecanică bună; Izolație sigură; Răcire bună	Cost ridicat față de înfășurarea cilindrică	JT	—	<200	≤35	2–4	8–10	12 la un început
4	Continuă în galeți	Idem	Idem	IT	JT	>20	≥3	1,2–3	12–18	4
5	Secționată (în galeți)	Idem	Idem	IT	—	<50	≤60	∅ 0,5–3		—
								2–4	3–6	
6	Stratificată	Tehnologie simplă	Rigiditate mecanică scăzută la conductoare rotunde	IT	JT	≤100	≥1	∅ 3–3,5		4
								2–5	4–6	
7	Înfășurare din folie	Rigiditate mecanică bună; Răcire bună; Comportare bună la impuls de tensiune	Tehnologia de izolare și de realizare a conexiunilor este mai complicată	JT	IT	20–1 000	<15	0,025–2	200–1 000	—

Plecînd de la înfășurarea de joasă tensiune, se determină dimensiunile geometrice ale ambelor înfășurări, cum sînt : înălțimile H_B, grosimile a_j și a_i, precum și diametrele interioare și exterioare ale acestora. Definitivarea acestor dimensiuni rămîne să fie confirmată de verificarea parametrilor de scurtcircuit și a temperaturilor înfășurărilor.

Cu aceste dimensiuni, lățimea ferestrei transformatorului în această etapă, conform figurii 3.8 rezultă

$$T = 2(a_{mj} + a_j + a_{ji} + a_i) + a_{ii} \quad [\mathrm{m}]. \qquad (3.37)$$

3.3.4. PRIZELE DE REGLAJ ȘI REDUCEREA SOLENAȚIILOR

Transformatoarele de putere se echipează cu dispozitive care permit reglajul tensiunii în trepte, prin schimbarea numărului de spire al uneia dintre înfășurări. Reglarea numărului de spire se efectuează cînd transformatorul este deconectat de la rețea sau cînd este în sarcină, în funcție de construcția comutatorului și de măsurile constructive adoptate în acest sens.

Prizele de reglaj pot fi prevăzute în principiu fie la înfășurarea primară, fie la cea secundară, prin modificarea sau păstrarea solicitărilor magnetice. La transformatoarele de putere, indiferent de rolul înfășurărilor ca primare sau secundare, de regulă înfășurarea de înaltă tensiune este prevăzută cu reglajul numărului de spire, din următoarele motive :

— scoaterea prizelor de reglaj este mai ușoară tehnologic, înfășurarea de înaltă tensiune fiind așezată la exterior, iar secțiunea conductoarelor este mai redusă ;

— numărul de spire necesar treptei de reglaj se poate ajusta mai ușor, fiind mai mare și, totodată, permițînd o poziționare mai adecvată pentru reducerea forțelor axiale ;

— comutatorul de prize este mai simplu, avînd contactele și bornele pentru curenți mai mici, chiar dacă cresc distanțele de izolație.

Reglajul tensiunii la transformatoarele de distribuție se face în limitele standardizate de ±5% ; la unele transformatoare mai mari, pentru diminuarea forțelor axiale se împart treptele la ±2 × 2,5%. În funcție de destinația transformatorului, se pot utiliza și alte trepte de reglaj a tensiunii, cum este cazul transformatoarelor cu reglaj sub sarcină la care se realizează trepte de forma ±6 × 1,67% = ±10% ; ±6 × 1,5% = ±9% ; ±8 × 1,25% = ±10% ; ±8 × 1,5% = ±12% ; ±9 × 1,78% = ±16% etc.

Schemele de principiu pentru reglajul tensiunii sînt date în figura 3.34.

Cazul din figura 3.34 *a* este întîlnit la înfășurările stratificate. La înfășurările stratificate conectate în stea, legătura la borne se scoate, de obicei de la interior (fig. 3.35), iar prizele de reglaj sînt aduse la un comutator de nul. La conexiunea în triunghi, poziția stratului de la care se face legătura la bornă este indiferentă.

La înfășurările stratificate, prizele de reglaj așezate pe ultimul strat nu produc asimetrii prea mari și, în consecință, nici forțe axiale însemnate.

În scopul reducerii și mai mult a disimetriilor datorate prizelor de reglaj, se poate utiliza schema din figura 3.36.

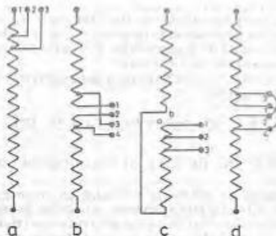


Figura 3.34. Scheme pentru reglarea tensiunii în limite mici.

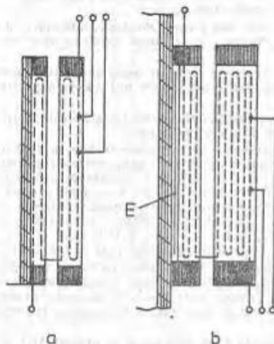


Figura 3.35. Scoaterea prizelor la înfășurările stratificate: a — înfășurare cu tensiune pînă la 10 kV b — înfășurare cu tensiunea pînă la 35 kV cu ecran electrostatic E legat la borna de linie.

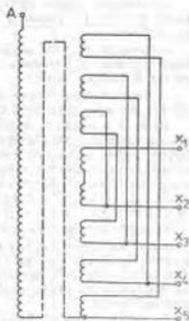


Figura 3.36. Modul de scoatere a prizelor de reglaj la înfășurările stratificate, pentru micșorarea neslmetriilor.

Scoaterea prizelor de reglaj de la înfăşurările stratificate se face sub formă de buclă, întărindu-se izolaţia, aşa cum se arată în figura 3.37.

Schemele din figura 3.34 *b*, *c* şi *d* sînt tipice pentru înfăşurările secţionate de tip galeţi. Cazul din figura 3.34 *c* este utilizat numai cînd înfăşurarea este conectată în stea şi se urmăreşte reducerea izolaţiei comutatorului, altfel trebuie lăsată o distanţă de izolaţie la jumătate din tensiunea de fază. În cazurile *b*, *c* şi *d* din figura 3.34, galeţii cu spirele de reglaj sînt aşezaţi fie la mijlocul înălţimii înfăşurării, fie repartizaţi simetric faţă de mijloc, la un sfert de înălţime începînd de la capete, cum se arată în figura 3.38.

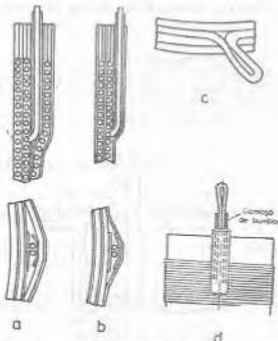


Figura 3.37. Modul de scoatere a prizei la o înfăşurare de tip stratificat.

La înfăşurările continue sau la cele cu galeţi dubli, se recomandă scoaterea prizelor de la trecerile exterioare dintre galeţi fără lipire, ca buclă din acelaşi conductor (1 — fig. 3.39 *a*).

Scoaterea prizelor printre galeţi (2 — fig. 3.39, *a*) se face cu lipituri şi o izolare corespunzătoare, mărindu-se şi canalul dintre galeţi, dacă este cazul. Scoaterea prizei din interiorul galetului (3 — fig. 3.39 *a*) nu se practică decît în cazuri speciale la galeţii realizaţi cu conductor rotund (fig. 3.39, *b* şi *c*).

Scoaterea din circuit a galeţilor de reglaj provoacă o asimetrie în repartiţia spaţială a solenaţiilor, asimetrie care este cauza forţelor electrodinamice axiale. Aceste forţe pot fi micşorate (reduse) prin rărirea spirelor în zonele de reglaj şi la cealaltă înfăşurare care nu este prevăzută cu prize de reglaj.

Această rărire a spirelor la înfăşurarea fără prize se face în zonele de reglaj în aşa fel încît solenaţia părţii rărite să fie egală cu jumătatea solenaţiei galeţilor de reglaj. Astfel, la un reglaj de $\pm 5\%$, care ocupă 10% din înălţimea bobinei, va trebui plasată numai 5% din solenaţia înfăşurării fără reglaj. Acest lucru se realizează prin creşterea distanţelor între galeţi sau spire.

La transformatoarele mari şi cu tensiuni înalte, cu izolaţia galeţilor de capăt întărită, apare o anumită neuniformitate a repartiţiei solenaţiei şi se impune, în acest caz, o rărire corespunzătoare şi a spirelor la înfăşurarea de joasă tensiune.

Rărirea spirelor se practică la transformatoarele de putere, începînd cu 800 kVA.

a b c

Figura 3.38. Scheme pentru reglarea tensiunii în limite mici: a — înfășurare cu o cale de curent; b — cu două căi de curent în paralel înfășurate în sensuri opuse; c — cu patru căi de curent în paralel, înfășurate succesiv în sensuri opuse.

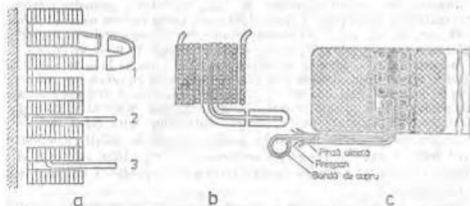


Figura 3.39. Posibilități de scoaterea prizelor și modul lor de izolare: a — la o înfășurare continuă în galeți; b — la galeții din conductor rotund, cu buclă a conductorului; c — cu bandă de cupru lipită.

3.4. CALCULUL PIERDERILOR ȘI CURENTULUI DE FUNCȚIONARE ÎN GOL [1, 2, 3, 4]

În timpul funcționării în transformator se produc pierderi atît în înfășurări datorită rezistenței electrice, cît și în miez, datorită curenților turbionari și fenomenului de histerezis, ca urmare a variației în timp cu frecvența f, a fluxului magnetic. Este important, de asemenea, de determinat curentul de magnetizare care crează solenația necesară producerii fluxului magnetic.

3.4.1. PIERDERILE ÎN ÎNFĂȘURĂRI ȘI MASELE CONDUCTOARELOR

— Rezistențele înfășurărilor pe fază — primară 1 și secundară 2 — se determină cu relația

$$R_{1,2} = \rho_t \frac{w_{1,2} l_{med\,1,2}}{s_{c1,2}} \quad [\Omega], \tag{3.38}$$

în care:

ρ_t este rezistivitatea materialului conductorului din care este făcută înfășurarea, la temperatura convențională de lucru t, în $\Omega mm^2/m$.

Pentru conductoarele din cupru electrolitic moale (*CuEm*):

$\rho_{Cu\,115°} = 0,0246\ \Omega mm^2/m$, pentru clasă de izolație F, la care $t = 115°C$ (la transformatoarele în aer — uscate);

$\rho_{Cu\,75°} = 0,022\ \Omega mm^2/m$, pentru clasă de izolație A, la care $t = 75°C$ (la transformatoarele în ulei).

Pentru conductoarele din aluminiu:

$\rho_{Al\,75°} = 0,037\ \Omega mm^2/m$ (deoarece aluminiul se folosește, în special, la transformatoarele în ulei);

$l_{med\,1,2}$ este lungimea medie a spirei înfășurării primare, respectiv înfășurării secundare, în m, și se determină din construcția grafică (la scară) a înfășurărilor.

De exemplu, pentru transformatoarele mici, cu miezul dreptunghiular, rezultă:

— pentru înfășurările suprapuse (fig. 3.6 *a*, *c*):

$$l_{med\,1} \approx 2(0,5\ \text{cm} + b + l_g + 2a_1)\ [\text{cm}];$$
$$l_{med\,2} \approx 2(0,5\ \text{cm} + b + l_g + 4a_1 + 2a_2)\ [\text{cm}]; \tag{3.39}$$

— pentru înfășurările separate (fig. 3.6 *b*):

$$l_{med\,1} \approx 2(0,5\ \text{cm} + b + l_g + 2a_1)\ [\text{cm}];$$
$$l_{med\,2} \approx 2(0,5\ \text{cm} + b + l_g + 2a_2)\ [\text{cm}]. \tag{3.39 a}$$

unde cei 0,5 cm țin seama de jocul de asamblare al carcasei pe miez și de grosimea carcasei bobinei care se confecționează de regulă din sticlotextolit gros de 1 mm (b, l_g, a_1 și a_2 se introduc în cm, apoi rezultatul se transformă în m).

Pentru transformatoarele mai mari, cu miezul în trepte, lungimea medie se determină în funcție de diametrul mediu al fiecărei înfășurări.

Astfel,

$$l_{med\,1,2} = \pi D_{m\,1,2} \quad [\mathrm{m}], \tag{3.39 b}$$

unde $D_{m1,2}$, sînt diametrele medii ale înfășurării primare, considerată de înaltă tensiune, respectiv secundare, date de relațiile (v. fig. 3.8):

$$\begin{aligned} D_{m2} &= D_c + 2a_{mj} + a_j \quad [\mathrm{cm}]; \\ D_{m1} &= D_c + 2(a_{mj} + a_j + a_{ji}) + a_i \quad [\mathrm{cm}]; \end{aligned} \tag{3.39 c}$$

$s_{w1,2}$ — secțiunea din STAS a conductorului, în mm².

— *Pierderile în înfășurări*:

— pentru înfășurarea primară 1 și secundară 2

$$P_{w1,2} = m k_{r1,2} R_{1,2} I_{1,2}^2 \quad [\mathrm{W}], \tag{3.40}$$

unde:

$k_{r1,2}$ este factorul de majorare a pierderilor în curent alternativ, față de cele în curent continuu.

Valoarea medie a acestui factor este:

— pentru înfășurările realizate din conductor rotund

$$k_r = 1 + 0{,}8\alpha_r^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4}\right)^2 d^4 m_s^2; \tag{3.40 a}$$

— pentru înfășurările din conductor profilat

$$k_r = 1 + 1{,}73\,\alpha_p^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4}\right)^2 a^4 (m_s^2 - 0{,}2) \tag{3.40 b}$$

și în care:

$$\alpha_r = k_R \frac{dn}{H_b}; \ \alpha_p = k_R \frac{bn}{H_b}, \tag{3.40 c}$$

k_R este coeficientul lui Rogowski și se determină cu relația (3.49 c);
n — numărul de conductoare pe înălțimea bobinei respective;
m_s — numărul de conductoare pe grosimea bobinei respective;
ρ se introduce în Ωmm²/m, iar dimensiunile în cm;

— *densitățile de suprafață* ale pierderilor din înfășurări sînt:

— pentru înfășurarea de joasă tensiune

$$q_j = \frac{P_{wj}}{cS_{wj}} \quad [\mathrm{W/m^2}]; \tag{3.41}$$

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune

$$q_i = \frac{P_{wi}}{cS_{wi}} \quad [\mathrm{W/m^2}], \tag{3.41 a}$$

unde S_{wj} și S_{wi} sînt ariile tuturor suprafețelor de răcire a înfășurărilor pe o coloană (c, este numărul de coloane), adică ale suprafețelor în contact cu agentul de răcire pentru fiecare din cele două înfășurări, în m² (din ariile canalelor de răcire se scad porțiunile ocupate de pene și distanțori — care ocupă cam 0,15—0,20 din ariile canalelor cilindrice). Ariile suprafețelor canalelor radiale

(orizontale) se vor reduce la jumătate, eficiența lor fiind micșorată în cazul circulației naturale a agentului de răcire.

Valorile lui q nu trebuie să depășească 1 200 W/m^2 la transformatoarele cu circulație naturală a uleiului și 2 000 W/m^2 la cele cu circulație forțată a uleiului.

La transformatoarele uscate în clasa de izolație F, limitele lui q sînt cuprinse între 300—700 W/m^2 (limitele superioare sînt pentru canale cu dimensiuni mai mari);

— pierderile totale electrice sau pierderile la funcționarea în scurtcircuit la curenții nominali

$$P_{kN} = P_{w1} + P_{w2} \quad [\text{W}]. \tag{3.41 b}$$

Valoarea obținută pentru P_{kN}, trebuie să fie apropiată de cea impusă inițial prin datele de proiectare (vezi paragraful 3.1). Dacă diferența este mare se reconsideră situația prin schimbarea secțiunii conductoarelor sau dimensiunilor înfășurărilor (abaterile admise sînt indicate în tabelul 2.2).

— *Masele conductoarelor* înfășurărilor primară 1 și secundară 2:

$$G_{w1,2} = \gamma_{1,2} s_{c1,2} w_{1,2} l_{med1,2} \quad [\text{kg}], \tag{3.42}$$

în care:

$\gamma_{Cu1,2} = 8{,}9 \cdot 10^{-3}$ kg/cm^3, este masa specifică a cuprului;
$\gamma_{Al1,2} = 2{,}7 \cdot 10^{-3}$ kg/cm^3, este masa specifică a aluminiului;
$s_{c1,2}$ — se introduce în cm^2;
$l_{med1,2}$ — se introduce în cm.

Pentru w_1 se consideră w_{1T}, dat de relația (3.10 b).

3.4.2. PIERDERILE ÎN FIER ȘI CURENTUL DE FUNCȚIONARE ÎN GOL

— *Masa netă a fierului* tuturor coloanelor c și, respectiv, tuturor jugurilor j:

— pentru transformatorul monofazat cu două coloane (fig. 3.2, *a*, *c* și fig. 3.6 *a*, *b*)

$$\begin{aligned} G_{Fec} &= 2S_c L_c \gamma_{Fe} \quad [\text{kg}]; \\ G_{Fej} &= 2S_j L_j \gamma_{Fe} \quad [\text{kg}]; \end{aligned} \tag{3.43}$$

— pentru transformatorul monofazat, în manta (fig. 3.3 și fig. 3.6 *c*)

$$\begin{aligned} G_{Fec} &= S_c L_c \gamma_{Fe} \quad [\text{kg}]; \\ G_{Fej} &= 2S_j (L_c + L_j) \gamma_{Fe} \quad [\text{kg}]; \end{aligned} \tag{3.43 a}$$

— pentru transformatorul trifazat cu trei coloane (fig. 3.2 *b*)

$$\begin{aligned} G_{Fec} &= 3S_c L_c \gamma_{Fe} \quad [\text{kg}]; \\ G_{Fej} &= 2S_j L_j \gamma_{Fe} \quad [\text{kg}]. \end{aligned} \tag{3.43 b}$$

în care:

$\gamma_{Fe} = 7{,}65 \cdot 10^{-3}$ kg/cm^3, este masa specifică a fierului tolelor;
L_c, L_j se introduc în cm;
S_c, S_j se introduc în cm^2.

— *Pierderile în fier*, ale transformatorului care reprezintă și pierderile la funcționarea în gol se calculează cu relația

$$P_0 \approx P_{Fe} = P_{Fec} + P_{Fej} = k_p p_{10/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} (B_c^2 G_{Fec} + B_j^2 G_{Fej}) \text{ [W]}, \qquad (3.44)$$

în care:

$k_p \approx 1,03\ldots1,07$ — dacă secțiunea miezului este în trepte;

$k_p \approx 1,05\ldots1,15$ — dacă secțiunea miezului este dreptunghiulară;

$p_{10/50}$ este cifra de pierderi specifice a materialului tolelor, din care este făcut miezul magnetic:

$p_{10/50}$ = 0,45 W/kg, dacă miezul se face din tablă silicioasă laminată la rece cu cristale orientate și grosime de 0,28—0,35 mm;

$p_{10/50}$ = 2,3 W/kg, dacă miezul se face din tablă silicioasă laminată la rece cu cristale neorientate și grosime de 0,5 mm (este cazul miezurilor în manta și din profile *E, U, L*);

B_c, B_j (vezi relațiile (3.12)) se introduc în T.

Observație: În practica fabricației transformatoarelor s-a constatat că valorile coeficientului de majorare a pierderilor în fier, datorită prelucrărilor tolelor prin ștanțare k_p, sînt mult mai mari, ajungînd pînă la $k_p = 1,2-1,25$.

— *Componenta activă a curentului de funcționare în gol*, se obține cu relația:

$$I_{0a} = \frac{P_{Fe}}{mU_{1f}} \text{ [A]}. \qquad (3.45)$$

— *Componenta reactivă a curentului de funcționare în gol sau curentul de magnetizare* (valoare eficace), se determină din legea circuitului magnetic aplicată pe un contur Γ corespunzător liniei mediane a cîmpului magnetic util, care parcurge atît coloanele și jugurile magnetice, cît și întrefierurile fictive de îmbinare dintre acestea.

Astfel, dacă n_δ este numărul întrefierurilor de îmbinare parcurse de conturul Γ, rezultă:

— pentru transformatorul monofazat cu două coloane

$$I_{0r} = I_\mu = \frac{2(H_c L_c + H_j L_j) + n_\delta \dfrac{B_i}{\mu_0}\delta_i}{\sqrt{2}\, w_1} \text{ [A]}, \qquad (3.46)$$

cu:

$n_\delta = 4$, dacă miezul este împachetat din tole simple (de profil *I*);

$n_\delta = 2$, dacă miezul este împachetat din tole de profil *L* etc.;

— pentru transformatorul monofazat în manta

$$I_{0r} = I_\mu = \frac{H_c L_c + H_j(L_c + L_j) + n_\delta \dfrac{B_i}{\mu_0}\delta_i}{\sqrt{2}\, w_1} \text{ [A]}, \qquad (3.46\text{ a})$$

cu:

$n_\delta = 4$, dacă miezul este împachetat din tole *E* și *I* (fig. 3.6 c);

$n_\delta = 1$, dacă miezul este împachetat din tole ca în figura 3.3 b);

— pentru transformatorul trifazat cu trei coloane (pentru coloanele extreme)

$$I_{0r} = I_{\mu} = \frac{H_c L_c + H_j L_j + n_2 \frac{B_i}{\mu_0} \delta_i}{\sqrt{2}\, w_1} \quad [A] \tag{3.46 b}$$

(pentru coloana din mijloc nu se mai ia produsul $H_j L_j$), cu $n_2 = 2$, pentru miezurile magnetice în construcție normală,

în care:

H_c, H_j sînt intensitățile cîmpului magnetic în coloană, și respectiv, în jugul miezului magnetic, în A/cm. Valorile lor se iau din curba de magnetizare $B = f(H)$ a tolelor din care este făcut miezul, pentru inducțiile respective B_c și B_j. Pentru tabla silicioasă laminată la rece cu cristale orientate de 0,28—0,35 mm grosime, această curbă este (sub formă de tabel) indicată în anexa 4, iar pentru tabla laminată la rece cu cristale neorientate de 0,5 mm grosime, în anexa 5;

L_c, L_j, se introduc în cm;

δ_i este lungimea întrefierului fictiv a rostului de îmbinare dintre tolele coloanelor și jugurilor, în m. În cazul miezurilor din tole cu cristale orientate de 0,35 mm grosime, la o îmbinare prin *întrețesere* și la valori obișnuite ale inducției maxime în coloană $B_c \leqslant 1{,}7$ T [6] $\delta_i = (0{,}02—0{,}04) \cdot 10^{-3}$ m(valorile mai mici se iau la îmbinarea sub un unghi de 45°);

În cazul miezurilor din tole cu cristale neorientate de 0,5 mm grosime, la o îmbinare prin *întrețesere* sub un unghi drept și valori ale inducției maxime în coloană $B_c \leqslant 1{,}1$ T [6], $\delta_i \leqslant 0{,}02 \cdot 10^{-3}$ m (valorile mai mici se iau în cazul utilizării tolelor profil E; U etc., pentru care numărul rosturilor de îmbinare dintre tole este mai mic);

B_i este amplitudinea inducției magnetice în întrefierul fictiv de îmbinare, în T, care se determină din condiția conservării fluxului magnetic, adică

$$B_i = \frac{B_c S_c}{S_i} = B_c \cos \alpha,$$

deoarece secțiunea de îmbinare

$$S_i = \frac{S_c}{\cos \alpha}$$

unde, α este unghiul de îmbinare al tolelor față de orizontală (la îmbinarea sub unghi drept, $\alpha = 0$);

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}.$$

Observație: Dacă în locul caracteristicii de magnetizare $B = f(H)$, firma furnizoare a tablei silicioase utilizată pentru miezul feromagnetic, indică puterea specifică de magnetizare q_{μ} în VAr/kg, la diferite inducții magnetice și frecvențe, atunci I_{0r} se determină cu

relația (3.45), dar în locul lui P_F, se ia puterea reactivă necesară magnetizării miezului Q_0, pentru întreaga masă a acestuia [2]

$$Q_0 = k_{qu}(q_c G_{Fec} + q_j G_{Fej}) \quad [\text{VAr}], \tag{3.46 c}$$

cu:

$k_{qu} = 1{,}05-1{,}12$, pentru îmbinările coloanelor cu jugurile sub un unghi drept;
$k_{qu} = 1{,}25-1{,}30$, pentru îmbinările sub unghiul $\alpha = 45° \pm 15°$.

— *Curentul (total)* la funcționarea în gol a transformatorului (valoare eficace)

$$I_{10} = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad [\text{A}] \tag{3.47}$$

sau în procente din curentul nominal absorbit de transformator

$$I_{10}\,[\%] = \frac{I_{10}}{I_{1N}} 100 \quad [\%]. \tag{3.47 a}$$

Valoarea obținută se compară cu cea impusă inițial prin datele de proiectare, de care trebuie să fie apropiată. Dacă diferența este mare se poate acționa, în sensul apropierii lor, asupra dimensiunilor miezului.

În mod normal, valorile lui $I_{10}\,[\%]$, pentru miezul feromagnetic din tablă silicioasă cu cristale orientate este sub 1,5%, iar pentru cel din tablă silicioasă cu cristale neorientate sub 3%.

3.5. TENSIUNEA DE SCURTCIRCUIT [1, 2, 3, 4]

— *Componenta activă* a tensiunii de scurtcircuit se determină cu relația:

$$u_{ka} = \frac{P_{kN}}{S_N} 100 \quad [\%]. \tag{3.48}$$

— *Componenta reactivă* a tensiunii de scurtcircuit:

— pentru *înfășurările cilindrice și concentrice*

$$u_{kr} = \frac{2\pi\mu_0 f w_1 I_1 l_m \delta' k_r}{e_s H_b} k_R 100 \quad [\%], \tag{3.49}$$

în care:

— lățimea echivalentă a canalului de scăpări este (fig. 3.8)

$$\delta' = a_{ji} + \frac{a_{je} + a_{ie}}{4} + \frac{a_j + a_i}{3} \quad [\text{cm}] \tag{3.49 a}$$

a_{ja} și a_{ia}, fiind lățimile canalelor de răcire (fig. 3.10 c și fig. 3.27 c);

— lungimea medie echivalentă a spirelor celor două înfășurări

$$l_m = \pi\left[D_i + 2a_{mj} + a_{ji} + \frac{a_i + a_{ia} + 3(a_j + a_{ja})}{2}\right] \quad [\text{m}]. \tag{3.49 b}$$

Dacă una din înfășurări sau ambele înfășurări nu sînt prevăzute cu canale axiale de răcire, atunci în relațiile (3.49 a și b) termenii a_{ja} sau/și a_{ia} se iau egali cu zero;

— coeficientul lui Rogowski

$$k_R = 1 - \frac{a_j + a_i + a_{ji}}{\pi H_b}. \tag{3.49 c}$$

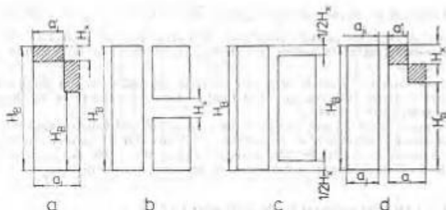


Figura 3.40. Asimetrii posibile la înfășurările transformatoarelor.

În cazul cînd cele două înfășurări ale transformatorului au solenațiile nesimetrice (fig. 3.40), atunci în relația (3.49) se introduce înălțimea H_B cu valoarea cea mai mare (în cm), care de regulă este pentru joasă tensiune, iar corectarea nesimetriilor se face cu factorul

$$k_q = 1 + \frac{x^2 H_B}{r \delta' k_R}. \tag{3.49 d}$$

unde:

$x = \frac{H_x}{H_B}$ (vezi fig. 3.40);
$r = 3$ pentru cazurile din figura 3.40 *b* și *c*;
$r = 0{,}75$ pentru cazul din figura 3.40 *d*.

De asemenea pentru cazurile din figura 3.40, *a* și *d*

$$H_x = \frac{a_1 - a_1'}{a_1}(H_B - H_B');$$

— pentru *înfășurările alternate simetric* (fig. 3.31)

$$u_{kr} = \frac{2\pi \mu_0 f w_1 I_1 l_{med} \delta'}{2 p b e_1} k_R \, 100 \quad [\%]. \tag{3.50}$$

unde (fig. 3.31):

$$\delta' = a_{ji} + \frac{h_j + h_i}{3} \quad [\text{cm}]; \tag{3.50 a}$$

$$k_R = 1 - \frac{2a_{ji} + h_j + h_i}{2\pi b}; \tag{3.50 b}$$

$l_{med} = \pi D_m$ [m] este chiar lungimea medie a spirelor celor două înfășurări (a galeților);
b — grosimea radială a galeților (fig. 3.31), în cm;
p — numărul de perechi de galeți întregi ai înfășurărilor (1 pereche = 1 galet de j.t. + 1 galet de i.t.). De exemplu în figura 3.31 *a* și *b*, rezultă $p = 2$.

Tensiunea de scurtcircuit $u_k = \sqrt{u_{ka}^2 + u_{kr}^2}$ [%], (3.50 c)

trebuie să fie pe cît posibil egală cu cea dată prin tema de proiectare, abaterea trebuind să se încadreze în valorile impuse de STAS 1703/1-80 (vezi tabelul 2.2).

Dacă valoarea calculată depășește abaterea admisă, se impun modificări în dimensionarea înfășurărilor, știut fiind faptul că ponderea cea mai mare o are componenta reactivă.

Se poate astfel acționa, după caz, fie asupra înălțimii bobinei, modificînd dimensiunile conductoarelor, a canalelor și a numărului de spire pe strat, fie prin schimbarea tipului de înfășurare, dacă acest lucru este în concordanță cu pierderile în înfășurări și densitatea de suprafață q a pierderilor.

3.6. CARACTERISTICILE DE FUNCȚIONARE [2, 3, 4]

La un transformator, în special la cele de putere utilizate în rețelele de distribuție, este indicat a se predetermina prin calcul, caracteristicile de funcționare în sarcină, dintre care mai importante sînt caracteristicile externe și ale randamentului.

3.6.1. CARACTERISTICILE EXTERNE

Reprezintă variația tensiunii secundare U_2, în funcție de variația curentului secundar I_2, cînd tensiunea primară U_1 și factorul de putere al sarcinii $\cos \varphi_2$, sînt constanți.

Este important de observat aceste caracteristici pentru diferite valori ale lui $\cos \varphi_2$ în funcție de caracterul sarcinii.

Aceste caracteristici se pot determina atît în valori absolute cît și în procente. Astfel, pornind de la relația care definește căderea de tensiune secundară în procente

$$\Delta u_2\,[\%] = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}}\,100$$

se obține, în unități relative

$$\frac{U_2}{U_{20}} = 1 - \frac{\Delta u_2\,[\%]}{100} = f(\beta), \text{ pentru } U_1 = \text{constant și } \cos \varphi_2 = \text{constant}, \tag{3.51}$$

în care:

$\beta = I_2/I_{2N}$ este valoarea relativă a sarcinii secundare;

$\Delta u_2\,[\%]$ — căderea de tensiune secundară, în procente, dată de relația

$$\Delta u_2\% = \beta(u_{ka} \cos \varphi_2 + u_{kr} \sin \varphi_2) + \frac{\beta^2}{200}(u_{kr} \cos \varphi_2 - u_{ka} \sin \varphi_2)^2 \quad [\%], \tag{3.51 a}$$

unde componentele tensiunii de scurtcircuit u_{ka} și u_{kr}, sînt în procente.

Dacă nu se indică prin temă factorul de putere al sarcinii secundare, atunci caracteristicile se determină pentru $\cos \varphi_2 = 1$, $\cos \varphi_2 = 0{,}7$ inductiv și $\cos \varphi_2 = 0{,}7$ capacitiv.

3.6.2. CARACTERISTICILE RANDAMENTULUI

Reprezintă valorile randamentului transformatorului, în funcție de valoarea relativă a sarcinii secundare, cînd tensiunea primară U_1 și factorul de putere al sarcinii $\cos \varphi_2$ sînt constante, adică (v. și relația (2.63))

$$\eta = \frac{\beta S_N \cos \varphi_2}{\beta S_N \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{kN} + P_0}, \text{ la } U_1 = \text{constant și } \cos \varphi_2 = \text{constant}, \quad (3.52)$$

unde, P_{kN} sînt pierderile electrice totale în înfășurări la sarcină nominală.

3.7. VERIFICAREA SOLICITĂRILOR MECANICE [1, 3, 9]

Din punct de vedere mecanic, elementele componente ale transformatorului sînt solicitate în primul rînd de forțele electrodinamice care apar în cazul scurtcircuitelor și în al doilea rînd atît de forțele necesare strîngerii miezului, cît și de greutatea părții decuvabile (ansamblu miez bobinat + capacul cuvei cu toate accesoriile pe el).

3.7.1. VERIFICAREA ÎNFĂȘURĂRILOR LA ACȚIUNEA FORȚELOR ELECTRODINAMICE

În cazul scurtcircuitului, înfășurările transformatorului, reprezintă două sisteme de conductoare paralele parcurse de curenți în sensuri contrare (neglijînd curentul de funcționare în gol, cele două solenații — primară 1 și secundară 2 — sînt considerate egale în valoare absolută, dar de sensuri contrare. Acest lucru rezultă din ecuația solenațiilor transformatorului dată de relația (2.5)). Deoarece prin înfășurări trec curenți de sens contrar, rezultă că între cele două înfășurări apar forțe de respingere (vezi fig. 3.41). În schimb,

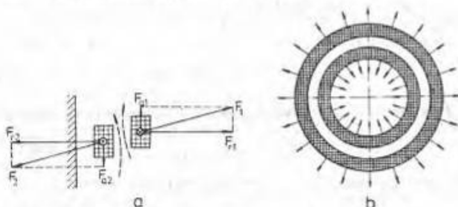


Figura 3.41. Forțele electrodinamice care acționează asupra înfășurărilor transformatorului: a — cazul general și descompunerea forței în forțe radiale și axiale; b — acțiunea forțelor radiale asupra celor două înfășurări.

elementele aceleiași înfășurări, fiind parcurse de un curent de același sens se atrag între ele formînd așa zisele forțe interioare F_i, care tind să comprime înfășurările în direcție axială.

Forțele electrodinamice de respingere dintre înfășurări ($F_1 = -F_2$) așa cum se indică și în figura 3.41 *a*, se pot descompune în două componente:

— *forțe radiale* F_r, care acționează astfel încît caută să întindă înfășurarea exterioară și s-o comprime pe cea interioară (fig. 3.41, *b*);

— *forțe axiale* F_a, care tind să deplaseze înfășurările în direcție axială, acționînd deci și asupra elementelor de consolidare axială a înfășurărilor.

După cum se observă din figura 3.41 *a*, forțele axiale dintre înfășurări apar *numai* în cazul cînd între solenațiile celor două înfășurări există nesimetrii axiale (adică înălțimile celor două solenații nu sînt egale). De aceea, pentru înlăturarea forțelor axiale sau reducerea lor, se caută ca în timpul funcționării transformatorului, aceste nesimetrii (introduse, de cele mai multe ori de treptele de reglaj al tensiunii) să fie cît mai mici.

Forțele electrodinamice există și în cazurile de funcționare normală, dar ele sînt mici și de aceea nu sînt luate în considerare. La scurtcircuit însă aceste forțe sînt de sute și chiar mii de ori mai mari și pot produce avarii transformatorului (ele depind de valoarea maximă adică de amplitudinea curentului, nu de valoarea eficace).

Curentul de șoc, la scurtcircuit brusc la bornele secundare (adică cel mai mare vîrf al curentului sau cea mai mare amplitudine) este

$$I_{sm} = k_A \frac{100\sqrt{2}\, I_{N1}}{u_k} \quad [A] \tag{3.53}$$

unde:

$k_A = 1 + e^{-\pi(u_{ka}/u_{kr})}$ este coeficientul de mărire a curentului datorită componentei aperiodice. Valorile lui k_A pot fi aproximate și în limitele:

$k_A = 1{,}2$—$1{,}3$ pentru transformatoarele de putere mică;

$k_A = 1{,}5$—$1{,}7$ pentru transformatoarele de putere mare ($S_N > 10$ kVA);

u_k — se introduce în procente [%].

Forța radială în cazul înfășurărilor concentrice, este dată de relația [3]

$$F_r = \mu_0 \frac{(w_1 I_{sm})^2 l_{med} k_R}{2H_B} \quad [N]. \tag{3.54}$$

Forța interioară care acționează în direcție axială asupra fiecărei înfășurări este

$$F_i = -\frac{\delta'}{2H_B} F_r \quad [N] \tag{3.54 a}$$

deci în valoare absolută, forța F_0 din figura 3.42 este

$$F_0 = |F_i| = \frac{\delta'}{2H_B} F_r \quad [N]. \tag{3.54 b}$$

δ', fiind dat de relațiile (3.49 a) sau (3.50 a).

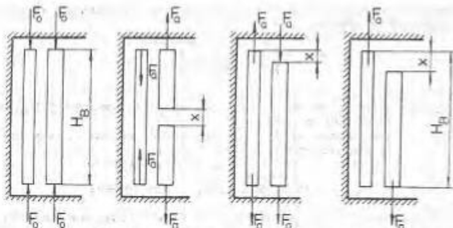


Figura 3.42. Explicativă la forțele axiale care acționează asupra înfășurărilor transformatorului.

Forța axială, datorită nesimetriei înfășurărilor (dacă înălțimile celor două înfășurări concentrice parcurse de curenți nu sînt egale), se obține cu expresia aproximativă

$$F_a \approx \frac{x}{80} F_r \quad [\mathrm{N}], \tag{3.55}$$

în care:

x, este nesimetria relativă a înfășurărilor

$$x = \frac{X}{H_B} 100, \tag{3.55 a}$$

X, fiind nesimetria geometrică a înfășurărilor (vezi fig. 3.42).

Efortul unitar la întindere în înfășurarea exterioară (de înaltă tensiune) este

$$\sigma_r = \frac{F_r}{2\pi w_i s_{wi}} \quad [\mathrm{MPa}] \tag{3.56}$$

cu s_{wi}, în mm² (1 Pa = 1 N/m²; 1 MPa = 1 N/mm²).

Această valoare a lui σ_r nu trebuie să depășească limitele admisibile

$$\sigma_{adm} = 30\text{—}60 \text{ MPa — pentru cupru;}$$

$$\sigma_{adm} = 22\text{—}30 \text{ MPa — pentru aluminiu.}$$

Înfășurarea interioară (de joasă tensiune), este supusă la comprimare; *efortul unitar* se determină tot cu relația (3.56), în care produsul $w_i s_{wi}$ se înlocuiește cu produsul $w_j s_{wj}$. Pentru ca solicitarea înfășurării interioare să fie de compresie pură, adică să nu apară solicitarea la încovoiere pe distanța dintre două pene consecutive, trebuie ca numărul de pene Z_p, de consolidare

a înfăşurării interioare de miezul feromagnetic (pe circumferinţa acestuia) să îndeplinească condiţia

$$Z_p \geqslant 2\sqrt{1 + \frac{1,75\ F_a}{E w_j s_{wj}}\left(\frac{D_{jm}}{2a}\right)^2} \tag{3.57}$$

în care:

D_{jm} este diametrul mediu al înfăşurării de joasă tensiune ($\varnothing D_{m2}$, în figura 3.8), în mm;

a — dimensiunea radială a conductorului de secţiune s_{wj}, exprimate în mm, respectiv în mm²;

— modulul de elasticitate al materialului conductor,

$$E_{Cu} = 1,15 \cdot 10^5\ \text{MPa} \text{ şi } E_{Al} = 0,99 \cdot 10^5\ \text{MPa}.$$

Eforturile unitare la compresiune datorate forţelor axiale, îndreptate către juguri sau la înfăşurările de tip în galeţi îndreptate către mijlocul înfăşurării, se determină cu relaţia

$$\sigma_a = \frac{F_a}{a_{1,2} b_d Z_d} \quad [\text{MPa}] \tag{3.58}$$

în care:

$a_{1,2}$ — grosimea înfăşurării 1 sau 2 (pentru care se face verificarea), în mm;

b_d — lăţimea distanţorilor din direcţia axială (cei din canalele transversale sau cei frontali) a înfăşurărilor, în mm;

Z_d — numărul distanţorilor din direcţia axială.

În cazul înfăşurărilor de tip cilindric sau stratificat, se determină şi efortul unitar de compresiune din cadrul înfăşurării (dintre conductoare) cu relaţia

$$\sigma_a = \frac{F_a}{l_{med\,1,2}\, a_{1,2}} \quad [\text{MPa}]. \tag{3.59}$$

cu $l_{med\,1,2}$ şi $a_{1,2}$ în mm.

Valorile determinate pentru σ_a nu trebuie să depăşească limitele admisibile şi anume:

$\sigma_{a\,adm} \approx 20$ MPa, pentru transformatoarele cu puteri pînă la 6 000 kVA;

$\sigma_{a\,adm} = 35$—40 MPa, pentru transformatoarele mai mari.

În transformatoarele cu înfăşurări alternate, forţa cea mai importantă care acţionează asupra înfăşurărilor (galeţilor) este cea axială, pentru care se obţine expresia [3]

$$F_a = \mu_0 \frac{(m_1 I_{1m})^2 l_{med} k_R}{2pb} \quad [\text{N}], \tag{3.60}$$

în care semnificaţia termenilor este aceeaşi ca în relaţia (3.50) şi figura 3.31.

Această forţă axială solicită galeţii (în special cei de capăt, sau cei din zona de reglaj a tensiunii) la compresiune, iar pe lungimea dintre două distanţoare izolante vecine şi la încovoiere.

Astfel, dacă pe lungimea dintre cele două distanțoare vecine, galetul se consideră ca o grindă încastrată la capete (în dreptul distanțorilor) și încărcată uniform pe toată lungimea, atunci momentul maxim de încovoiere este [1]

$$M = \frac{F_d l^2}{12 l_{med}} \quad [\text{N mm}], \tag{3.60 a}$$

unde, lungimea dintre două distanțoare vecine este (vezi și rel. (3.58)):

$$l = \frac{l_{med}}{Z_d} - b_d \quad [\text{mm}].$$

Efortul unitar de încovoiere este

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad [\text{MPa}], \tag{3.60 b}$$

unde W, este modulul de rezistență al galetului (de exemplu pentru un galet din conductor profilat $W = w_g \frac{ab^2}{6}$ [mm³]).

Efortul unitar la încovoiere nu trebuie să depășească 70 MPa pentru cupru și 15—20 MPa pentru aluminiu.

3.7.2. CALCULUL MECANIC AL SCHELEI METALICE

a) *Consolele de presare a jugurilor*, executate din oțel profilat (cel mai frecvent profilul *U*) se calculează la încovoiere datorită forței de presare a jugurilor și tot la încovoiere, însă în direcție axială, datorită forțelor axiale de scurtcircuit.

Momentul încovoietor, corespunzător forței de presare a jugurilor este (vezi fig. 3.43):

— pentru transformatorul monofazat

$$M_y = \frac{F_s L}{8} \quad [\text{Nmm}]; \tag{3.61}$$

— pentru transformatorul trifazat

$$M_y = \frac{F_s L}{32} \quad [\text{Nmm}] \tag{3.61 a}$$

unde, forța de presare a jugului este

$$F_s = p_s h_j L \quad [\text{N}] \tag{3.62}$$

în care:

p_s = 0,2—0,6 MPa, este presiunea necesară stringerii tolelor jugului. Valorile mai mari se iau pentru cazuri cînd stringerea se face cu buloane care trec și prin miez (evident izolate). În cazul stringerii numai cu buloane marginale (neizolate) se iau limitele inferioare;

h_j — înălțimea jugului, în mm;

L — distanța dintre buloanele extreme, în mm (fig. 3.43).

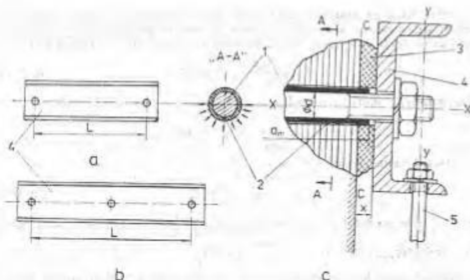


Figura 3.43. Explicativă la calculul mecanic al schelei metalice : a — pentru transformatorul monofazat ; b — pentru transformatorul trifazat ; c — detaliu cu secțiune prin buloanele de strîngere ; 1 — bulon de strîngere ; 2 — manșon (tub) izolant ; 3 — izolație ; 4 — consolă de presare ; 5 — tirant (se montează în spațiul dintre înfășurări).

Efortul unitar la încovoiere, datorită presării

$$\sigma_y = \frac{M_y}{W_y} \leqslant 100 \text{ MPa}, \qquad (3.63)$$

unde W_y este modulul de rezistență al profilului după axa $y—y$, în mm³.

Verificarea consolelor de presare la încovoiere, datorită forțelor axiale de scurtcircuit se face cu relația [3]

$$\sigma_x = \frac{F_a L}{12\, W_x} \leqslant 200 \text{ MPa}, \qquad (3.63\text{ a})$$

unde W_x este modulul de rezistență al profilului după axa $x—x$, în mm³.

b) *Buloanele de strîngere* a consolelor de presare se calculează la întindere datorită forței de presare a jugului și la încovoiere datorită ridicării părții decuvabile (partea care se introduce în cuvă, compusă din ansamblu miez magnetic + ansamblu înfășurări + schela metalică) ; ele trebuie însă verificate și la încovoiere datorită forțelor axiale de scurtcircuit.

Efortul unitar în bulon, datorită forței de presare și greutății părții decuvabile, trebuie să satisfacă relațiile :

— pentru transformatorul monofazat

$$\sigma = 0{,}5\,\frac{F_s}{S_b} + 2{,}5\,\frac{Gx}{d^3} \leqslant 100 \text{ MPa} ; \qquad (3.64)$$

— pentru transformatorul trifazat

$$\sigma = 0,187 \frac{F_s}{S_s} + 2,5 \frac{Gx}{d^2} \leqslant 100 \text{ MPa}, \qquad (3.64\ a)$$

unde (vezi şi fig. 3.43):

G este greutatea părţii decuvabile, în N;
F_s — forţa de presare, dată de relaţia (3.62);
d — diametrul bulonului, în mm;
S_b — aria secţiunii bulonului (la baza filetului) în mm²;
x — distanţa de la jug la consolă (grosimea izolaţiei — poz. 3), în mm; de obicei $x = 3$—5 mm.

Verificarea buloanelor la forţa axială de scurtcircuit [3]:
— pentru transformatorul monofazat

$$\sigma = \frac{4,2 F_0 x}{d^3} \leqslant 200 \text{ MPa}; \qquad (3.65)$$

— pentru transformatorul trifazat

$$\sigma = \frac{4,6 F_0 x}{d^3} \leqslant 200 \text{ MPa}. \qquad (3.65\ a)$$

c) Verificarea la strivire a *tubului izolant al bulonului* (numai în cazul cînd buloanele — izolate — trec prin miez):
— la ridicare, datorită greutăţii decuvabile

$$\sigma_{st} = 0,25 \frac{G}{d\, a_m} \leqslant 20 \text{ MPa}; \qquad (3.66)$$

unde a_m, este lungimea manşonului izolant, în mm (fig. 3.43);
— la scurtcircuit, datorită forţelor axiale:
— pentru transformatorul monofazat

$$\sigma_{st(sc)} = \frac{0,42\ F_0}{d\, a_m} \leqslant 40 \text{ MPa}; \qquad (3.67)$$

— pentru transformatorul trifazat

$$\sigma_{st(sc)} = \frac{0,46\ F_0}{d\, a_m} \leqslant 40 \text{ MPa}. \qquad (3.67\ a)$$

Observaţie: Pentru transformatoarele cu nesimetrii axiale ale înfăşurărilor la relaţiile (3.65) şi (3.67) în locul lui F_0 se va lua forţa F_a, determinată cu relaţia (3.55).

3.8. CALCULUL TERMIC AL TRANSFORMATORULUI [1, 2, 4, 9]

Calculul termic al transformatorului se face în funcţie de modul de răcire: cu ulei sau cu aer (uscat).

Simbolizarea sistemelor uzuale de răcire a transformatoarelor în ulei (cele mai folosite), este făcută funcţie de circulaţia uleiului şi a agentului de răcire care preia căldura de la ulei şi o cedează mediului ambiant şi anume:

NL — circulaţia naturală a uleiului (*N*) şi mişcare liberă (*L*) a aerului care răceşte cuva;

NS — circulaţie naturală a uleiului (*N*) şi cuva ventilată prin suflare (*S*) cu aer;

FL — circulația forțată a uleiului (*F*) și mișcare liberă (*L*) a aerului care răcește cuva ;

FS — circulație forțată a uleiului (*F*) și cuva ventilată prin suflare (*S*) cu aer ;

FA — circulație forțată a uleiului (*F*) și răcirea cu apă (*A*) a uleiului.

3.8.1. CALCULUL TERMIC AL ÎNFĂȘURĂRILOR, RĂCITE CU ULEI

Creșterea maximă admisă a temperaturii unei înfășurări în raport cu mediul ambiant este determinată de clasa de izolație a transformatorului. La o clasă de izolație dată, căderea de temperatură de la înfășurare la temperatura standard a mediului ambiant este constantă. Această cădere de temperatură poate fi într-o singură treaptă, cum este cazul transformatoarelor uscate în aer, sau în mai multe trepte, cum este cazul transformatoarelor în ulei (fig. 3.44).

> *Atenție.* În lucrare se notează cu *t temperatura* și cu ϑ, *căderea de temperatură* $(t_2 - t_1)$ denumită și *încălzire* sau *supra-temperatură*.

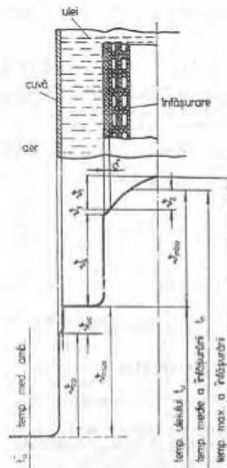


Figura 3.44. Repartiția căderilor de temperatură de la înfășurare la mediul ambiant, în cazul transformatoarelor în ulei.

Reprezentarea din figura 3.44 a repartiției temperaturilor și căderilor de temperatură, într-un transformator cu ulei, clarifică și mai mult sensul valorilor din tabelul 3.8.

TABELUL 3.8

Valorile medii ale căderilor de temperatură ϑ_{miu} *și* ϑ_{mua} *în °C*

Mod de răcire	ϑ_{miu}	ϑ_{mua}
NL	22–24	48–46
NS	24–26	46–44
FS și *FA*	28–30	42–40

Pentru transformatoarele în ulei, izolate în clasa *A*, la care căderea medie de temperatură între înfășurare și mediul ambiant este de 70°C, se dă în tabelul 3.8 o repartiție orientativă a

acestei căderi de temperatură în două trepte: înfășurare-ulei ($\vartheta_{ui} = \vartheta_2 + \vartheta_3 + \vartheta_4$) și ulei-mediul ambiant ($\vartheta_{mu} = \vartheta_{u} + \vartheta_{vu}$), notațiile din text fiind în concordanță cu cele din figura 3.44.

A. **Căderile de temperatură în înfășurări** depind de forma bobinelor și a conductoarelor precum și de grosimea și natura materialelor utilizate la izolarea conductoarelor și izolarea straturilor [9].

Calculele se fac pentru căderile de temperatură maxime din bobine ϑ_1, dar în practică se utilizează căderile medii de temperatură ϑ_2; între aceste căderi de temperatură este relația

$$\vartheta_2 = \frac{2}{3}\,\vartheta_1 \quad [^\circ\mathrm{C}]. \tag{3.68}$$

a) *În cazul înfășurărilor cilindrice* (fig. 3.10) la care fiecare conductor este în contact cu uleiul cel puțin pe o parte, se poate considera că temperatura medie a bobinei este egală cu cea maximă (fig. 3.44) și deci căderile de temperaturi, maximă (ϑ_1) și medie (ϑ_2), din interiorul bobinei, sînt nule, adică $\vartheta_1 = \vartheta_2 = 0$; căderea de temperatură a bobinei este, în acest caz, egală numai cu căderea de temperatură în izolația conductorului de pe partea care vine în contact cu agentul de răcire și se determină cu relația

$$\vartheta_2 = q\,\frac{\delta}{\lambda_{iz}}\cdot 10^{-4} \quad [^\circ\mathrm{C}], \tag{3.69}$$

în care:

δ, este grosimea izolația conductorului, pe o parte, în cm;

λ_{iz} — conductibilitatea termică a materialului izolant, în W/cm °C care se alege din tabelul 3.9;

q — densitatea de suprafață a pierderilor în bobina considerată, în W/m². Valoarea lui q se determină pentru fiecare bobină în parte (vezi relațiile (3.41)), însă în relația (3.69) se introduce valoarea cea mai mare. Pierderile în bobină P_b de la numărătorul relațiilor (3.41) sînt pentru cazurile din figura 3.10 *a* și *b*: $P_b = P_{wj}$, iar pentru cazul din figura 3.10 *c*: $P_b = 0{,}5P_{wj}$, notațiile fiind cele de la paragraful 3.4.1 (vezi relația (3.40)).

TABELUL 3.9

Conductibilitatea termică a principalelor materiale izolante folosite la transformatoarele în ulei

Material	λ [W/cm°C]
Bandă de bumbac lăcuită	0,0027
Bandă de pînză bachelizată	0,0027
Țesătură lăcuită	0,0025
Hîrtie uscată	0,0012
Hîrtie impregnată în ulei	0,0014
Hîrtie impregnată în lac	0,0017
Prespan	0,0017
Carton impregnat în lac	0,0014

Aria suprafețelor de cedare a căldurii, pentru bobina considerată, se determină scăzînd din aria suprafețelor cilindrice aria suprafețelor acoperite de pene, cu luarea în considerare a lățimii c_1 a penelor pentru fiecare parte. Astfel, pentru o parte a bobinei, aria ocupată de pene va fi

$$S_{p1} = Z_p H_B c_1 \quad [\mathrm{m}^2]. \tag{3.70}$$

b) În cazul *bobinelor stratificate* (fig. 3.27) de grosime a_b (a_i sau a_j) și a celor secționale fără canale radiale (fig. 3.25), valoarea maximă a temperaturii bobinei este la 0,5 a_b cînd răcirea se face pe ambele părți. În acest caz, căderea maximă de temperatură în bobină se determină cu relația

$$\vartheta_1 = \frac{p a_b^2}{8\lambda_m} \quad [^\circ\mathrm{C}] \tag{3.71}$$

(pentru galeți prin a_b se înțelege grosimea galetului a_g (fig. 3.25)).

În cazul cînd bobinele stratificate sînt bobinate direct pe cilindrul izolant și au numai o singură suprafață de răcire, atunci valoarea maximă a temperaturii se află la 0,75 a_b față de canalul de răcire, iar căderea maximă de temperatură în bobină este dată de relația :

$$\vartheta_1 = 0{,}28 \frac{p a_b^2}{\lambda_m} \quad [^\circ\mathrm{C}] \tag{3.71 a}$$

În relațiile (3.71) și (3.71 a), a_b se ia în cm, iar ceilalți termeni sînt :

p — pierderile specifice produse într-un cm³ de material activ din înfășurări, în W/cm³, care se determină cu relațiile :

— pentru conductor rotund

$$p = k_\rho \frac{J^2 d^2}{(d' + \delta_i)d'} \cdot 10^{-2} \quad [\mathrm{W/cm^3}]; \tag{3.72}$$

— pentru conductor profilat

$$p = k_\rho \frac{J^2 ab}{(a' + \delta_i)b'} \cdot 10^{-2} \quad [\mathrm{W/cm^3}], \tag{3.72 a}$$

în care dimensiunile a, a', b, b' și d, d' ale conductoarelor, se iau în cm ;

δ_i — grosimea izolației dintre straturi, în cm ;

J — densitatea de curent, în A/mm². Constantele de material au pentru cupru valorile $k_\rho = 1{,}68$ și $k_p = 2{,}14$ iar pentru aluminiu, $k_\rho = 2{,}71$ și $k_p = 3{,}44$;

λ_m — conductibilitatea termică medie, în W/cm °C a înfășurărilor, care se determină cu relațiile [1] :

— pentru conductor rotund

$$\lambda_m = \lambda_i \left(\frac{d}{2\delta + \delta_i} + \frac{2\delta + \delta_i}{d' + \delta_i} \right) \quad [\mathrm{W/cm\,^\circ C}]; \tag{3.73}$$

— pentru conductor profilat

$$\lambda_m \approx \lambda_i \frac{(a' + \delta_i)b}{(2\delta + \delta_i)b'} \quad [\mathrm{W/cm\,^\circ C}], \tag{3.73 a}$$

în care :

$$\lambda_i = \frac{\lambda\lambda_i(2\delta + \delta_i)}{\lambda_i 2\delta + \lambda\delta_i} \quad [\mathrm{W/cm\,^\circ C}], \tag{3.73 b}$$

este conductibilitatea termică echivalentă a izolației ;

λ — conductibilitatea termică a izolației conductorului, în W/cm°C

λ_i — conductibilitatea termică a materialului izolant dintre straturi, în W/cm °C care se iau din tabelul 3.9 ;

d', a' și b' — dimensiunile conductoarelor izolate, în cm ;

d, a și b — dimensiunile conductoarelor neizolate, în cm ;

$2\delta = d' - d$, respectiv $2\delta = a' - a = b' - b$, în cm, este grosimea bilaterală a izolației conductorului.

În cazul cînd izolația dintre straturi δ_i nu se consideră, în relațiile (3.73), (3.73 a) și (3.73 b) se ia $\delta_i = 0$.

Conductibilitățile termice ale materialelor izolante utilizate, λ și λ_i, se aleg din tabelul 3.9.

c) În cazul *înfășurărilor spiralate* și a celor de *tipul în galeți*, cu canale radiale (fig. 3.15, 3.20 și 3.26), la care elementul de bază — spira sau galetul — cedează căldură atît prin suprafețele verticale, cît și prin cele orizontale, căderea maximă de temperatură se calculează cu relația

$$\vartheta_1 = \frac{p a_b^2}{8\left(\lambda_{mr} + \lambda_{ma}\frac{a_b^2}{h_b^2}\right)} \quad [^\circ\mathrm{C}] \tag{3.74}$$

în care, în afara notațiilor cunoscute, h_b este înălțimea galetului, în cm.

Conductibilitatea termică medie în direcția radială λ_{mr}, se determină cu relația (3.73), pentru conductoarele rotunde și cu relația (3.73 a) pentru conductoarele profilate.

Conductibilitatea termică medie în direcția axială λ_{ma}, se determină cu aceleași relații, însă în care se schimbă b cu a, a' cu b' și b' cu a'.

B. **Căderile medii de temperatură între suprafața bobinelor și mediul de răcire se determină pe baza unor relații semiempirice, reieșite din practică.**

a) În cazul *înfășurărilor cilindrice sau stratificate* răcite cu ulei și realizate din conductoare profilate sau rotunde, căderea medie de temperatură între suprafața bobinei și ulei se determină cu relația

$$\vartheta_2 = 0{,}285\, q^{0,6} \quad [^\circ\mathrm{C}], \tag{3.75}$$

în care q este densitatea de suprafață a pierderilor din bobina considerată, în W/m².

Relația (3.75) este valabilă numai dacă lățimile canalelor verticale nu au valorile mai mici decît cele indicate în paragraful 3.3.3 punctul B.

b) În cazul *înfășurărilor spiralate* și a celor de *tipul în galeți* cu *canale orizontale*, răcite cu ulei și realizate din conductoare profilate sau rotunde,

căderea medie de temperatură între suprafața bobinei și ulei se determină cu relația semiempirică

$$\vartheta_3 = 0{,}35 k_1 k_2 k_3 q^{0,6} \ [^\circ\mathrm{C}], \qquad (3.76)$$

în care:

— factorul k_1 depinde de sistemul de răcire al transformatorului și are valorile: $k_1 = 1{,}0$ pentru sistemul NL, $k_1 = 0{,}9$ pentru NS și $k_1 = 0{,}7$ pentru FS (vezi simbolizările de la paragraful 3.8);

— factorul k_2 ține seama de posibilitățile de circulație verticală a uleiului și are valoarea $k_2 = 1{,}0$ pentru suprafețele exterioare de la înalta tensiune și $k_2 = 1{,}1$ pentru înfășurările interioare ale joasei tensiuni;

— factorul k_3 ține seama de posibilitățile de circulație ale uleiului în canalele orizontale și se dă în tabelul 3.10 funcție de raportul dintre înălțimea bobinei (galetului) și grosimea radială a bobinei.

TABELUL 3.10

Valoarea factorului k_3 din relația (3.76) în funcție de raportul dintre înălțimea bobinei (galetului) h_b și grosimea ei radială a_b (pentru galeți a_g).

h_b/a_b	0,07–0,08	0,08–0,09	0,1	0,11–0,12	0,13–0,14	0,15–0,19	2
k_3	1,1	1,05	1,0	0,95	0,9	0,85	0,8

c) În toate cazurile studiate, *căderile medii de temperatură* dintre înfășurare și ulei, date de relația

$$\vartheta_{mbu} = \vartheta_2 + \vartheta_3 + \vartheta_4 \quad [^\circ\mathrm{C}], \qquad (3.77)$$

nu trebuie să se abată mult de la valorile indicate în tabelul 3.8. Creșterea căderii de temperatură ϑ_{mbu} peste limitele din tabel și scăderea corespunzătoare a căderii de temperatură ulei-mediul ambiant, atrage după sine o diminuare a posibilității de supraîncărcare a transformatorului și, totodată, o creștere a suprafețelor de cedare a căldurii către mediul ambiant; o valoare mai mică a lui ϑ_{mbu} are efecte contrare, dar necesită o dimensionare mai largă a înfășurărilor.

3.8.2. CALCULUL TERMIC AL MIEZULUI RĂCIT CU ULEI

Calculul termical miezului feromagnetic se limitează la estimarea căderii maxime de temperatură dintre miez și ulei, $\vartheta_{max\,fu}$ care are influență asupra îmbătrînirii uleiului și a izolației dintre tole [9]. Această cădere de temperatură se estimează cu relația semiempirică [1]

$$\vartheta_{max\,fu} = \vartheta' \frac{\vartheta_4'' + 1{,}5\vartheta_4'''}{\vartheta' + \vartheta_4'' + 1{,}5\vartheta_4'''} \quad [^\circ\mathrm{C}], \qquad (3.78)$$

în care:

$$\vartheta' = \vartheta_1' + \vartheta_4' \quad [^\circ C];$$

$$\vartheta_1' = \frac{pa^2}{8\lambda_l} \quad [^\circ C];$$

$$\vartheta_4' = \frac{pa}{2\alpha_{conv}} \quad [^\circ C];$$

$$\vartheta_1'' = \frac{pb^2}{8\lambda_t} \quad [^\circ C]; \qquad (3.78\ a)$$

$$\vartheta_4'' = \vartheta_4' \frac{b}{a} \quad [^\circ C],$$

sînt temperaturi fictive de calcul, unde:

— dimensiunile echivalente a și b ale secțiunii miezului feromagnetic (fig. 3.45) se iau în cm;

— coeficientul de transmisie prin convecție a căldurii $\alpha_{conv} \approx 100$ W/m²°C = 0,01 W/cm² °C;

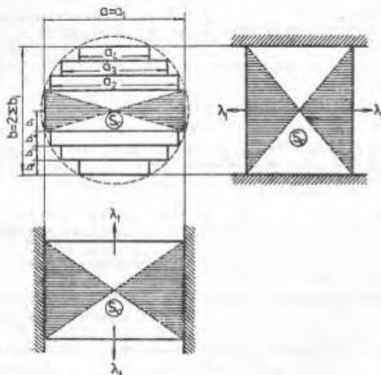


Figura 3.45. Dimensiunile echivalente ale coloanei (cu secțiunea netă de fier S_c), care păstrează și aceleași arii de cedare a căldurii prin suprafețele longitudinale și transversale, față de tole.

— conductibilitatea termică longitudinală a pachetului λ_l și cea transversală față de tole λ_μ, în W/cm°C, se iau din tabelul 3.11;

TABELUL 3.11

Valorile conductibilităților termice λ_l și λ_μ

Material	λ_l[W/cm°C]	λ_μ[W/cm°C]
Tablă laminată la rece izolată cu carlit	0,19—0,21	0,026—0,03
Tablă laminată la cald (3—4% Si) și izolată cu lac (20 μm)	0,20	0,025
Tablă laminată la cald (1,8—2,3% Si) — izolată cu lac — izolată cu hîrtie	0,26—0,3	— 0,43 0,25

— pierderile pe unitatea de volum se determină cu relația

$$p = p_{Fe}\gamma_{Fe}k_{Fe} \quad [\text{W/cm}^3], \tag{3.79}$$

în care:

p_{Fe} sînt pierderile specifice, în W/kg, corespunzătoare inducției magnetice din miez, date de relația (vezi și relația (3.44)).

$$p_{Fe} = k_p p_{10/50}\left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} B_c^2 \quad [\text{W/kg}]; \tag{3.79 a}$$

unde

$$\gamma_{Fe} = 7\,650 \text{ kg/m}^3 = 7,65 \cdot 10^{-3} \text{ kg/cm}^3,$$

iar k_{Fe} are valoarea din relația (3.4).

Căderea de temperatură $\vartheta_{max\,fa}$ nu este limitată prin norme, dar pentru a nu conduce la îmbătrînirea uleiului în timp, se recomandă să nu depășească 30—35°C.

3.8.3. CALCULUL CĂDERII DE TEMPERATURĂ DINTRE PERETELE CUVEI CU ULEI ȘI AERUL DIN EXTERIOR

Pentru calculul căderii de temperatură dintre peretele cuvei și aer ϑ_{ca} sînt necesare stabilirea suprafețelor de cedare a căldurii prin convecție și prin radiație. Determinarea acestora nu se poate face decît prin iterație, pornind de la unele date considerate a fi cît mai apropiate de realitate. Apoi, avînd pe ϑ_{ca}, aria suprafeței de radiație S_r și aria suprafeței de convecție S_{co}, se pot scrie relațiile de verificare a evacuării pierderilor din transformator:

$$P_r = \alpha_r\vartheta_{ca}S_r \quad [\text{W}];$$
$$P_{co} = \alpha_{co}\vartheta_{ca}S_{co} \quad [\text{W}]; \tag{3.80}$$
$$P_r + P_{co} = 1,05(P_k + P_o) \quad [\text{W}].$$

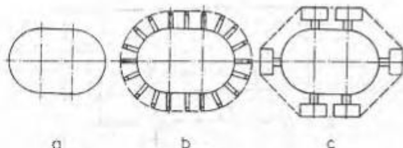


Figura 3.46. Suprafețele echivalente de radiație ale cuvelor: a — cuvă cu pereți netezi ($S_{rr} = S_r$); b — cuvă cu țevi; c — cuvă cu radiatoare. Suprafețele de radiație sînt indicate cu linie întreruptă.

A. Estimarea căderii de temperatură dintre cuvă și aer, ϑ_{ca} se face într-o primă aproximație cu relația:

$$\vartheta_{ca} \leqslant t_N - t_a - \vartheta_{uc} - \vartheta_{mba} \quad [^\circ C], \tag{3.81}$$

în care:

— temperatura nominală a înfășurării t_N este stabilită de clasa de izolație a transformatorului și pentru clasa A, $t_N = 105^\circ C$;

— căderea de temperatură ϑ_{mba} este dată de relația (3.77), pe baza elementelor calculate;

— căderea de temperatură ϑ_{uc} variază între 5°C și 6°C.

Pentru valorile menționate în cazul clasei de izolație A și temperatura mediului ambiant $t_a = 35^\circ C$, relația (3.81) devine:

$$\vartheta_{ca} \leqslant 65^\circ - \vartheta_{mba} \quad [^\circ C]. \tag{3.81 a}$$

Dacă se ține seama de variația temperaturii uleiului și a bobinelor pe verticală, pentru a nu se depăși temperatura de lucru corespunzătoare clasei A de izolație deoarece temperatura maximă a uleiului depășește cu cel puțin 10°C temperatura medie, și relația (3.81 a) trebuie scrisă sub forma:

$$\vartheta_{ca} \leqslant 55^\circ - \vartheta_{mba} \quad [^\circ C]. \tag{3.81 b}$$

B. Aria suprafeței de radiație a transformatorului definită de figura 3.46 se poate aprecia luînd ca bază dimensiunile cuvei și anume (fig. 3.47):

— pentru cuvele dreptunghiulare

$$S_r = kS_{cr} = 2(A + B)H_{cr}k \cdot 10^{-4} \quad [m^2]; \tag{3.82}$$

— pentru cuvele ovale

$$S_r = kS_{cr} = [2(A - B) + \pi B]H_{cr}k \cdot 10^{-4} \quad [m^2], \tag{3.82 a}$$

în care dimensiunile A, B și H_{cr} (fig. 3.47) sînt în cm, iar factorul k are valorile: $k = 1$ pentru cuvele netede; $k = 1{,}2 - 1{,}5$ pentru cuvele cu pereți ondulați sau cu țevi și $k = 1{,}5 - 2$ pentru cuvele cu radiatoare (S_{cr} este aria suprafeței cuvei propriu-zise).

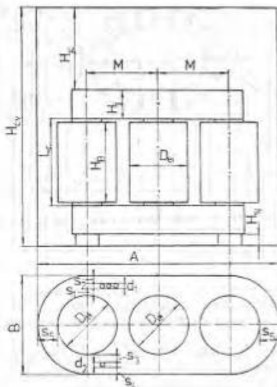


Figura 3.47. Dimensiunile cuvei transformatorului în ulei.

Dimensiunile cuvei, pentru transformatoarele în ulei, cu tensiunile nominale ale înfășurării de înaltă tensiune pînă la 60 kV, se determină, conform figurii 3.47 cu relațiile :

$$A = 2M + D_{et} + 2s_5 \quad [\text{mm}];$$

$$B = D_{et} + s_1 + s_2 + d_1 + s_3 + s_4 + d_2 \quad [\text{mm}]; \qquad (3.83)$$

$$H_{cv} = L_c + 2H_j + H_{jc} + H_{cj} \quad [\text{mm}].$$

unde :

— valorile distanțelor de izolație $s_1, s_2, \ldots, s_5$ (cu semnificațiile din fig. 3.47) se aleg din tabelul 3.12 (d_1, d_2 sînt dimensiunile conductoarelor de legătură) ; cel mai frecvent $s_5 = s_3 + s_2 + s_4$;

— distanța H_{jc} de la jug la capacul cuvei se ia în funcție de valoarea tensiunii nominale a înfășurării de înaltă tensiune din tabelul 3.13 ;

— D_{et} este diametrul exterior al înfășurării de înaltă tensiune.

TABELUL 3.12

Distanțele minime de izolație pentru conductoarele de legătură ale transformatoarelor în ulei

U_n [kV]	Dimensiuni, în mm			
	Δi	d	s	s_l
6	0 0 2	<6 >6 >6	15 12 10	20 17 15
10	0 0 2	<6 >6 >6	23 18 10	25 22 17
15	0 0 2	<6 >6 >6	32 27 15	33 30 23
20	0 0 2	<6 >6 >6	40 35 22	38 37 30
35	2 4 6	⩾10	40 30 25	50 42 40
60	5	⩾12	40	55
110	20	⩾12	75	170

Notă. Δi — este grosimea izolației conductorului de legătură, pe o parte; d — dimensiunea conductorului pe direcția înfășurare-cuvă; s — distanța la conductorul neizolat la cuvă sau la înfășurarea proprie; s_l — distanța de la conductorul neizolat la grinzile de strîngere sau alte piese legate la pămînt, care prezintă muchii.

TABELUL 3.13

Distanțele minime de la jug la capacul cuvei, H_{jc}

U [kV]	6	10	20	35*	110**
H_{jc} [mm]	270	300	300	470*	500**

* Pentru transformatoarele trifazate cu $S_n \geqslant 1\,600$ kVA și comutatorul de reglaj prins la capacul cuvei, se ia $H_{jc} = 850$ mm.

** La tensiunea de 110 kV, bornele de intrare pentru înaltă tensiune sînt dispuse între jug și peretele cuvei, iar H_{jc} s-a ales numai în funcție de posibilitatea unei bune evacuări a pierderilor din transformator.

C. **Aria suprafeței de convecție** se aproximează cu relația

$$S_{cr} = \frac{1{,}05(P_k + P_0)}{2{,}5\,\vartheta_{cu}^{1,25}} - 1{,}12\ S_r \quad [\mathrm{m}^2]. \tag{3.84}$$

Aria preliminară a elementelor de răcire S_{er}, atașate cuvei propriu-zise de arie S_{cr} din relațiile (3.82) și (3.82 a), va fi:

$$S_{er} = S_{cc} - S_{co} \quad [\mathrm{m}^2]. \tag{3.85}$$

Dacă se alege tipul de cuvă cu țevi sau cu lire, atunci se determină lungimea totală a țevilor și suprafețele lor utilizînd datele țevilor folosite.

Dacă se utilizează tipurile de radiatoare din figura 1.25 și figura 1.26 atunci se face uz de tabelele 1.3 și 1.4.

În cazul transformatoarelor mari, bateriile sînt tipizate, avînd în vedere puterea care poate fi evacuată.

Avînd ariile S_{er}, S_{cr} și S_{co}, se așază într-o primă variantă elementele de răcire aferente cuvei, apoi se determină, pentru acest caz, S_r și S_{cr}.

D. **Căderea de temperatură între cuvă și aer**, cu ariile S_r și S_{cv} determinate mai sus, va fi:

$$\vartheta_{ca} = \left[\frac{1{,}05(P_k + P_0)}{2{,}8\,S_r + 2{,}5\,S_{cv}}\right]^{0,8} \quad [^\circ\mathrm{C}]. \tag{3.86}$$

Dacă valoarea ϑ_{ca} a ieșit prea mare sau prea mică față de valoarea care rezultă din relația (3.81 b), atunci se acționează asupra ariei S_{er}, mărind-o sau micșorînd-o, recalculînd după aceea pe S_r, S_{cv} și ϑ_{ca}.

3.8.4. DETERMINAREA SUPRATEMPERATURILOR ÎNFĂȘURĂRILOR ȘI ULEIULUI FAȚĂ DE TEMPERATURA MEDIULUI AMBIANT, PENTRU TRANSFORMATOARELE ÎN ULEI

A. **Căderea de temperatură între ulei și cuvă** se determină în final cu o precizie mai mare utilizînd relația:

$$\vartheta_{uc} = 0{,}165\,k_1\left[\frac{1{,}05(P_k + P_0)}{S_{cv}}\right]^{0,6} \quad [^\circ\mathrm{C}], \tag{3.87}$$

în care $k_1 = 1$ pentru răcirea naturală și $k_1 = 0{,}9$ pentru răcirea forțată cu aer.

B. **Supratemperatura straturilor superioare ale uleiului față de aer** care se consideră cu 20% mai mare decît valoarea medie

$$\vartheta_{Mua} = 1{,}2\,\vartheta_{mua} = 1{,}2(\vartheta_{uc} + \vartheta_{ca}) \leqslant 60^\circ\mathrm{C}. \tag{3.88}$$

C. **Supratemperaturile bobinelor înfășurărilor față de mediul ambiant** (aer) vor fi (vezi fig. 3.44):

$$\vartheta_{ba} = \vartheta_{mbu} + \vartheta_{uc} + \vartheta_{ca} \leqslant t_N - t_a \quad [^\circ\mathrm{C}], \tag{3.89}$$

unde $t_N = 105^\circ\mathrm{C}$ pentru clasa de izolație A.

Dacă relațiile (3.88) și (3.89) nu sînt îndeplinite se revine, de asemenea, la modificarea valorilor lui S_r și S_{cv}.

3.8.5. ESTIMAREA ÎNCĂLZIRII TRANSFORMATORULUI USCAT (ÎN AER)

Depășirea temperaturii înfășurărilor și miezului transformatorului peste temperatura mediului ambiant (în special pentru transformatoarele mici, în aer), poate fi determinată aproximativ cu relația:

$$\vartheta_{\hat{i}a} \approx \frac{P_{\hat{i}} + P_{s}}{\alpha_0 (S_{i} + S_{Fe})} + \Delta\vartheta \quad [°C], \tag{3.90}$$

în care:

α_0 $= (10 - 12) \cdot 10^{-4}$ W/cm² °C, este coeficientul mediu de transmitere a căldurii de pe suprafețele deschise ale înfășurărilor și miezului transformatorului;

S_i, S_{Fe} — suprafețele deschise (libere) ale înfășurărilor și miezului transformatorului, în cm²;

$\Delta\vartheta$ $\approx 10 \div 15$°C — căderea de temperatură de la straturile interioare ale înfășurării la cele exterioare.

Pentru o funcționare corespunzătoare, trebuie satisfăcută condiția

$$\vartheta_{\hat{i}a} \leqslant \vartheta_{adm}, \tag{3.90 a}$$

unde $\vartheta_{adm} = 100$°C, pentru izolație de clasă F, este supratemperatura admisă.

Pentru transformatoarele uscate de puteri mai mari se va lua $\alpha_0 = 6 \cdot 10^{-4}$ W/cm²°C, iar q nu trebuie să depășească limitele indicate la paragraful 3.4.1 (vezi relațiile (3.41) și (3.41 a)).

3.8.6 ÎNCĂRCAREA TRANSFORMATOARELOR, LA TEMPERATURI SCĂZUTE ALE MEDIULUI AMBIANT

Transformatoarele atît în ulei cît și uscate, dimensionate pentru o temperatură a mediului ambiant $t_a > 20$°C, dar care funcționează la o temperatură mai mică, se pot încărca cu o putere mai mare, cu 1% pentru fiecare grad, sub 20°C. În aceleași condiții, la răcirea cu radiatoarele ventilate, puterea crește cu 0,75% pentru fiecare grad.

Transformatoarele care au tipul de răcire NL și sînt suflate cu aer, deci devin răcite NS, se pot încărca cu 25% pînă la 35% peste puterea lor nominală.

Cînd se urmărește calculul unui transformator cu modul de răcire NS, se ține seama că valoarea coeficientului de transmisie a căldurii prin convecție crește de 1,7 pînă la 1,8 ori, lucru care echivalează cu scăderea ariei suprafețelor răcite prin convecție în același raport față de tipul NL.

3.8.7 INFLUENȚA FACTORILOR EXTERNI ASUPRA ÎNCĂLZIRII TRANSFORMATOARELOR

Factorii externi cum sînt altitudinea locului de montare, vîntul, precipitațiile atmosferice și razele solare, influențează temperatura de lucru a transformatoarelor cu răcire naturală. Dar, dintre acești factori, singurul care are o influență permanentă este altitudinea locului de montare.

A. Un transformator cu răcire naturală destinat să funcționeze la o **altitudine** h, pentru a-și păstra aceeași temperatură de lucru, va trebui ca pierderile evacuate $(P_k + P_0)$ să fie luate, în calcule, mai mari, cu valoarea (în procente) [1]

$$p = \frac{1{,}25\,\Delta\vartheta}{1 - \frac{\Delta\vartheta}{100}} \quad [\%], \tag{3.91}$$

în care:

$$\Delta\vartheta = 4{,}4\,\frac{h}{1 + \frac{S_r}{S_c}} \quad [^\circ C], \tag{3.91 a}$$

unde altitudinea h, se ia în km.

În cazul utilizării unui transformator normal la altitudinea h, rezultă că la sarcina nominală, el va avea o temperatură de lucru mai mare cu valoarea dată de relația (3.91 a).

B. **Vîntul**, ca și **precipitațiile atmosferice** de orice natură, au o influență favorabilă asupra răcirii transformatoarelor montate în aer liber. În schimb, *razele solare* pot conduce la o creștere suplimentară a temperaturii transformatorului cu 5—10°C și chiar mai mult, la transformatoarele mici.

3.9. EXEMPLE DE CALCUL AL TRANSFORMATOARELOR

Exemplele de calcul indică succesiunea reală a etapelor dimensionării transformatoarelor electrice, făcîndu-se trimiterile corespunzătoare la părți ale textului, la relații și figuri. Totodată, exemplele de calcul au scopul de a verifica relațiile de calcul cu unitățile de măsură indicate în text și de a arăta cum se acționează pentru obținerea parametrilor ceruți și cum se rotunjesc datele obținute.

Exemplele de calcul sînt variante care se încadrează în datele temei de proiectare. Optimizarea construcției unui transformator la parametri dați se poate face sub diferite aspecte, cum ar fi greutatea minimă, cost minim al materialelor active și izolante, cost total minim incluzînd și costurile de fabricație sau pe cele de exploatare pentru o perioadă de timp stabilită prin temă etc. Indicațiile cuprinse în lucrare, la alegerea diferiților parametri, înlesnesc acest lucru.

Algoritmul folosit în exemplele de calcul, se poate utiliza și la proiectarea transformatoarelor cu calculatoarele electronice.

Trebuie menționat că, chiar pentru un proiectant cu experiență, găsirea unei soluții bune, nu optime, necesită compararea mai multor variante de calcul pentru aceiași parametri impuși; acest lucru se poate realiza ușor cu ajutorul calculatoarelor electronice.

3.9.1 EXEMPLU DE CALCUL AL UNUI TRANSFORMATOR MONOFAZAT DE MICĂ PUTERE, RĂCIT CU AER (USCAT)

Temă: Să se proiecteze un transformator monofazat, de mică putere cu următoarele date:
— $S_N = 100$ VA;
— $U_{1N}/U_{2N} = 220/16$ V;
— $f = 50$ Hz;
— $\cos \varphi_2 = 1$;
— tipul constructiv: în manta;
— sistemul de răcire: în aer

Transformatorul va avea în secundar, începînd de la 12 V, prize din 2 în 2 V, adică: 12, 14 şi 16 V.

A. **Calculul circuitului magnetic**

— *Secţiunea coloanei*, conform relaţiei (3.1):

$$S_c = C_t \sqrt{\frac{S_1}{f}} = 5 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{100}{50}} = 7{,}07 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2 = 7{,}07\ \text{cm}^2. \qquad (3.92)$$

— *Dimensiunile miezului* coloanei de formă dreptunghiulară, considerind $b/l_p \approx 1{,}25$ rezultă, conform relaţiei (3.3)

$$S_c = k_{Fe} b l_p = 1{,}25\ k_{Fe} l_p^2,$$

de unde se obţine lungimea pachetului:

$$l_p = \sqrt{\frac{S_c}{1{,}25\ k_{Fe}}} = \sqrt{\frac{7{,}07}{1{,}25 \cdot 0{,}95}} = 2{,}45\ \text{cm};$$

— lăţimea coloanei

$$b \approx 1{,}25\ l_p = 1{,}25 \cdot 2{,}45 = 3{,}05\ \text{cm}.$$

Prin rotunjire, se stabilesc următoarele dimensiuni ale coloanei:

$$b = 3\ \text{cm}; \quad l_p = 2{,}5\ \text{cm}. \qquad (3.93)$$

pentru care rezultă următoarea secţiune a coloanei

$$S_c = k_{Fe} b l_p = 0{,}95 \cdot 3 \cdot 2{,}5 = 7{,}12\ \text{cm}^2. \qquad (3.93\ \text{a})$$

Secţiunea jugului, considerind miezul în manta, conform relaţiei (3.6):

$$S_j = \frac{1}{2} S_c = \frac{1}{2} \cdot 7{,}12 = 3{,}56\ \text{cm}^2. \qquad (3.94)$$

Fiind un transformator mic, lăţimea T a ferestrei (fig. 3.6 c) se va determina după dimensionarea înfăşurărilor; în prealabil însă se va stabili înălţimea coloanei şi deci a bobinei.

— *Înălțimea coloanei*, conform relației (3.8):

$$L_c = \frac{S_1}{100\,Ae_1} = \frac{100}{100\cdot 80\cdot 0{,}158} = 7{,}9\cdot 10^{-2}\ \text{m} = 7{,}9\ \text{cm},$$

în care:

$A = 80$ A/cm — din tabelul 3.2;

e_1 — conform relației (3.8 b) este:

$$e_1 = 4{,}44\,fS_cB_c = 4{,}44\cdot 50\cdot 7{,}12\cdot 10^{-4}\cdot 1 = 0{,}158\ \text{V}, \tag{3.95}$$

unde, din tabelul 3.2 se impune $B_c = 1T$, deoarece miezul fiind în manta din tole profil E și I, se utilizează tablă silicioasă laminată la rece cu cristale neorientate, groasă de 0,5 mm.

Prin rotunjire se alege $L_c = 8$ cm.

B. **Calculul înfășurărilor**

— *T.e.m. din primar și din secundar*, conform relațiilor (3.11):

$$E_1 = U_1 - \frac{\Delta u[\%]U_1}{200} = 220 - \frac{10\cdot 220}{200} = 209\ \text{V};$$

$$E_2 = U_2 + \frac{\Delta u[\%]U_2}{200} = 16 + \frac{10\cdot 16}{200} = 16{,}8\ \text{V},$$

în care, din figura 3.5 s-a luat $\Delta u[\%] = 10\%$.

— *Numărul de spire* al înfășurărilor, conform relațiilor (3.10) și (3.10 c):

$$w_1 = \frac{E_1}{e_1} = \frac{209}{0{,}158} = 1\,320\ \text{spire};$$

$$w_2 = \frac{E_2}{e_1} = \frac{16{,}8}{0{,}158} = 106\ \text{spire}.$$

— Pentru celelalte prize de tensiune, corespund următoarele numere de spire în secundar:

— pentru 14 V

$$w_2' = w_2\frac{14}{16} = 106\frac{14}{16} \approx 93\ \text{spire};$$

— pentru 12 V

$$w_2'' = w_2\frac{12}{16} = 106\frac{12}{16} \approx 80\ \text{spire}.$$

— *Valorile definitive* ale fluxului magnetic și inducțiilor magnetice:

— fluxul magnetic util, conform relației (3.12)*

$$\Phi = \frac{E_1}{4{,}44\,fw_1} = \frac{209}{4{,}44\cdot 50\cdot 1\,320} = 0{,}712\cdot 10^{-3}\ \text{Wb};$$

— inducția magnetică în coloană, conform relației (3.12 a):

$$B_c' = \frac{\Phi}{S_c} = \frac{0{,}712\cdot 10^{-3}}{7{,}12\cdot 10^{-4}} = 1\ T;$$

— inducția magnetică în jug, conform relației (3.12 c)

$$B_j = \frac{\Phi}{2\,S_j} = \frac{0{,}712 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3{,}56 \cdot 10^{-4}} = 1\ \text{T}.$$

— *Curenții nominali* ai transformatorului, conform relațiilor (3.13):

$$I_1 = \frac{S_N \cos\varphi_2}{mU_1\eta\cos\varphi_1} = \frac{100 \cdot 1}{1 \cdot 220 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}9} = 0{,}595\ \text{A};$$

$$I_2 = \frac{S_N}{mU_2} = \frac{100}{1 \cdot 16} = 6{,}25\ \text{A},$$

unde s-a considerat $\cos\varphi_1 \approx 0{,}9$, iar $\eta = 0{,}85$ din figura 3.5.

— *Secțiunile orientative ale conductoarelor*, conform relațiilor (3.14)

$$s_{w1} = \frac{I_1}{J_1} = \frac{0{,}595}{2{,}6} = 0{,}23\ \text{mm}^2;$$

$$s_{w2} = \frac{I_2}{J_2} = \frac{6{,}25}{2{,}6} = 2{,}4\ \text{mm}^2,$$

unde, din tabelul 3.2 s-a luat $J_1 = J_2 = 2{,}6\ \text{A/mm}^2$, pentru ambele înfășurări, utilizîndu-se conductoare de cupru.

— *Dimensiunile conductoarelor* se aleg din STAS 685-75 (anexa 1 tabelul 1 — *I*) astfel:

— pentru înfășurarea primară, conductor rotund izolat cu un strat de email tereftalic (*ET*):

$$d_1 = \varnothing 0{,}56\ \text{mm} \Rightarrow s_{w1} = 0{,}246\ \text{mm}^2.$$

iar din axa 3, s-a luat $d_1' - d_1 = 0{,}1$ mm (pentru a lucra cu acoperire) rezultind deci:

$$d_1' = 0{,}66\ \text{mm};$$

— pentru înfășurarea secundară, conductor rotund izolat tot cu email tereftalic (*ET*):

$$d_2 = \varnothing 1{,}8\ \text{mm} \Rightarrow s_{w2} = 2{,}545\ \text{mm}^2$$

și de asemenea din anexa 3, $d_2' - d_2 = 0{,}1$ mm rezultind

$$d_2' = 1{,}9\ \text{mm}.$$

— *Valorile definitive* (recalculate) ale densităților de curent, conform relațiilor (3.14 c):

$$J_1 = \frac{I_1}{s_{w1}} = \frac{0{,}595}{0{,}246} = 2{,}42\ \text{A/mm}^2;$$

$$J_2 = \frac{I_2}{s_{w2}} = \frac{6{,}25}{2{,}545} = 2{,}45\ \text{A/mm}^2.$$

— *Dimensiunile înfășurărilor*:

— Înălțimea bobinelor, conform relației (3.15)

$$H_B = L_c - 5\ \text{mm} = 80 - 5 = 75\ \text{mm} = 7{,}5\ \text{cm};$$

— numărul de spire pe un strat conform relațiilor (3.16) :

— pentru primar

$$w_{s1} = \frac{H_B}{d_1'} = \frac{75}{0{,}66} = 113 \text{ spire};$$

— pentru secundar

$$w_{s2} = \frac{H_B}{d_2'} = \frac{75}{1{,}9} = 39 \text{ spire};$$

— numărul de straturi, conform relațiilor (3.17) :

— pentru primar

$$n_{s1} = \frac{w_1}{w_{s1}} = \frac{1\,320}{113} = 11{,}7 \text{ — adică 12 straturi};$$

— pentru secundar

$$n_{s2} = \frac{w_2}{w_{s2}} = \frac{106}{39} = 2{,}72 \text{ — adică 3 straturi};$$

— grosimile bobinelor, conform relațiilor (3.18) :

— pentru primar

$$a_1 = n_{s1}d_1' = 12 \cdot 0{,}66 = 7{,}9 \text{ mm} \approx 8 \text{ mm};$$

— pentru secundar

$$a_2 = n_{s2}d_2' = 3 \cdot 1{,}9 = 5{,}7 \text{ mm} \approx 6 \text{ mm}.$$

— *Lățimea ferestrei* transformatorului (fig. 3.6 c), conform relației (3.9) rezultă

$$T = 1 + 2 + a_1 + a_2 + 3 = 1 + 2 + 8 + 6 + 3 = 20 \text{ mm}.$$

C. Calculul pierderilor și curentului de funcționare în gol

— Rezistențele înfășurărilor, conform relației (3.38) avînd conductoare din cupru și clasa de izolație F :

— pentru înfășurarea primară

$$R_1 = \rho_{115} \cdot \frac{w_1 l_{med\,1}}{s_{c1}} = 0{,}0246 \frac{1\,320 \cdot 0{,}152}{0{,}246} = 20 \ \Omega;$$

— pentru înfășurarea secundară

$$R_2 = \rho_{115} \cdot \frac{w_2 l_{med\,2}}{s_{c2}} = 0{,}0246 \frac{106 \cdot 0{,}208}{2{,}545} = 0{,}213 \ \Omega,$$

unde conform relațiilor (3.39), lungimile medii sînt :

$$l_{med\,1} \approx 2(0{,}5 + b + l_y + 2a_1) = 2(0{,}5 + 3 + 2{,}5 + 2 \cdot 0{,}8) = = 15{,}2 \text{ cm} = 0{,}152 \text{ m};$$

$$l_{med\,2} \approx 2(0{,}5 + b + l_y + 4a_1 + 2a_2) = 2(0{,}5 + 3 + 2{,}5 + 4 \cdot 0{,}8 + 2 \cdot 0{,}6) = = 20{,}8 \text{ cm} = 0{,}208 \text{ m}.$$

— *Pierderile în înfășurări* conform relației (3.40), considerînd $k_{r1} \approx$ $\approx k_{r2} \approx 1$:

— pentru înfășurarea primară

$$P_{w1} = m_1 R_1 I_1^2 = 1 \cdot 20 \cdot 0{,}595^2 = 7{,}1 \text{ W};$$

— pentru înfășurarea secundară

$$P_{w2} = m_2 R_2 I_2^2 = 1 \cdot 0{,}213 \cdot 6{,}25^2 = 8{,}3 \text{ W};$$

— pierderile totale în înfășurări

$$P_k = P_{w1} + P_{w2} = 7{,}1 + 8{,}3 = 15{,}4 \text{ W}.$$

— *Masa conductoarelor* înfășurărilor, conform relației (3.42):

$$G_{w1} = \gamma_{Cu} s_{w1} w_1 l_{med\,1} = 8{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}246 \cdot 10^{-2} \cdot 1\,320 \cdot 15{,}2 = 0{,}44 \text{ kg};$$

$$G_{w2} = \gamma_{Cu} s_{w2} w_2 l_{med\,2} = 8{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot 2{,}545 \cdot 10^{-2} \cdot 106 \cdot 20{,}8 = 0{,}5 \text{ kg}.$$

— *Masa netă a fierului*, conform relațiilor (3.43 a):

$$G_{Fec} = S_c L_c \gamma_{Fe} = 7{,}12 \cdot 8 \cdot 7{,}65 \cdot 10^{-3} = 0{,}436 \text{ kg};$$

$$G_{Fej} = 2 S_j (L_c + L_j) \gamma_{Fe} = 2 \cdot 3{,}56 (8 + 10) \cdot 7{,}65 \cdot 10^{-3} = 0{,}98 \text{ kg},$$

unde conform relației (3.9 e) și figurii 3.6 *e*

$$L_j = 2(b + T) = 2(3 + 2) = 10 \text{ cm}.$$

— *Pierderile totale în fier*, conform relației (3.44):

$$P_0 \approx P_{Fec} + P_{Fej} = k_p p_{10/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} (B_c^2 G_{Fec} + B_j^2 G_{Fej}) =$$

$$= 1{,}03 \cdot 2{,}3 \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} (1^2 \cdot 0{,}436 + 1^2 \cdot 0{,}98) = 3{,}35 \text{ W},$$

unde $p_{10/50} = 2{,}3$ W/kg, considerînd miezul din tablă laminată la rece cu cristale neorientate și grosimea de 0,5 mm.

— *Curentul de funcționare în gol:*

— componentă activă, conform relației (3.45)

$$I_{0a} = \frac{P_{Fe}}{m U_{1f}} = \frac{3{,}35}{1 \cdot 220} = 0{,}0152 \text{ A};$$

— componenta reactivă sau curentul de magnetizare, conform relației (3.46 a)

$$I_{0r} = I_\mu = \frac{H_c L_c + H_j (L_c + L_j) + n_\delta \dfrac{B_i}{\mu_0} \delta_i}{\sqrt{2}\, w_1} =$$

$$= \frac{5{,}02 \cdot 8 + 5{,}02(8 + 10) + 4 \dfrac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0{,}015 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2} \cdot 1\,320} = 0{,}096 \text{ A}.$$

în care, din anexa 5, s-au determinat:

pentru $B_c = 1$ T $\Rightarrow H_c = 5{,}02$ A/cm;

pentru $B_j = 1$ T $\Rightarrow H_j = 5{,}02$ A/cm;

$n_\delta = 4$, fiind un miez de forma indicată în figura 3.6 c;

$B_i = B_c = 1$ T, îmbinările făcîndu-se sub un unghi drept;

$\delta_i \approx 0{,}015 \cdot 10^{-3}$ m, deoarece utilizînd tole profil (*E, I*) numărul rosturilor de îmbinare dintre tole este mai mic;

— *curentul total*, la funcționarea în gol, conform relației (3.47)

$$I_{10} = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} = \sqrt{0{,}0152^2 + 0{,}096^2} = 0{,}0975 \text{ A},$$

sau în procente din I_{1N}, conform relației (3.47 a)

$$I_{10}[\%] = \frac{I_{10}}{I_{1N}} 100 = \frac{0{,}0975}{0{,}505} \cdot 100 = 16{,}5\%,$$

valoare cam mare însă obișnuită la transformatoarele mici și cu miezul feromagnetic din tablă silicoasă cu cristale neorientate.

— *Randamentul transformatorului*, conform relației (3.52) la sarcină nominală ($\beta = 1$), în procente

$$\eta = \frac{S_N \cos \varphi_2}{S_N \cos \varphi_2 + P_k + P_{Fe}} 100 = \frac{100 \cdot 1}{100 \cdot 1 + 15{,}4 + 3{,}35} \cdot 100 = 84{,}5\%$$

apropiat de valoarea considerată din figura 3.5 (85%).

D. **Calculul termic**

— *Estimarea încălzirii transformatorului*, conform relației (3.90)

$$\vartheta_{0a} \approx \frac{P_k + P_{Fe}}{\alpha_0(S_i + S_{Fe})} + \Delta\vartheta = \frac{15{,}4 + 3{,}35}{10 \cdot 10^{-4}(136 + 152)} + 15 = 70{,}2^\circ\text{C},$$

unde

— suprafața liberă a bobinei este

$$S_i \approx [2(0{,}5 + b + l_g + 4a_1 + 4a_2) - 2l_c]H_B = [2(0{,}5 + 3 + 2{,}5 +$$
$$+ 4 \cdot 0{,}8 + 4 \cdot 0{,}6) - 2 \cdot 2{,}5]7{,}5 = 136 \text{ cm}^2$$

și reprezintă suprafața laterală exterioară a bobinei mai puțin partea din dreptul ferestrei transformatorului (a coloanelor laterale);

— suprafața liberă a miezului (suprafața laterală + frontală, fără cea inferioară):

$$S_{Fe} \approx 4(L_j + L_c) + l_g\left(L_j + 2L_c + 4\frac{b}{2}\right) = 4(10 + 8) + 2{,}5(10 +$$
$$+ 2 \cdot 8 + 4 \cdot 1{,}5) = 152 \text{ cm}^2.$$

Se obsevă că este satisfăcută relația (3.90 a), adică:

$$\vartheta_{0a} = 70{,}2^\circ\text{C} < \vartheta_{adm} = 100^\circ\text{C},$$

pentru clasa de izolație *F*, ceea ce înseamnă că transformatorul este bine dimensionat.

3.9.2. EXEMPLU DE CALCUL AL UNUI TRANSFORMATOR TRIFAZAT DE PUTERE MEDIE, ÎN ULEI

Temă: Să se proiecteze un transformator trifazat de putere medie, în ulei cu înfășurări din cupru și cu miezul feromagnetic din tole de tablă silicioasă laminată la rece cu cristale orientate (cifra de pierderi $p_{10/50} = 0,45$ W/kg) cu următoarele date:

$S_N = 250$ kVA;
$U_{iN} = 10$ kV;
$U_{jN} = 0,4$ kV;
$m = 3$;
$f = 50$ Hz;
conexiunea $Dy_n - 5$;
$u_k = 6\%$;
reglaj de tensiune $\pm 5\%$;
$P_0 = 550$ W;
$P_k = 3\,200$ W.

Reglajul tensiunii se face fără sarcină, pe înfășurarea de înaltă tensiune.

A. **Calculul circuitului magnetic**

— *Secțiunea coloanei*, conform relației (3.1):

$$S_c = C_1\sqrt{\frac{S_1}{f}} = (4 \div 6)\cdot 10^{-4}\sqrt{\frac{83,5\cdot 10^3}{50}} = (16,3 \div 24,5)\cdot 10^{-4}\ \text{m}^2 = \\ = 163 \div 245\ \text{cm}^2, \qquad (3.96)$$

unde, puterea aparentă pe o coloană, avînd în vedere că transformatorul va avea trei coloane și înfășurările concentrice, este:

$$S_1 = \frac{S_N}{3} = \frac{250}{3} = 83,5\ \text{kVA} = 83,5\cdot 10^3\ \text{VA}.$$

— *Diametrul coloanei*, considerînd că secțiunea coloanei este în trepte, rezultă conform relației (3.2 a):

$$D_c = \sqrt{\frac{4S_c}{\pi k_m}} = \sqrt{\frac{4(163 \div 245)\cdot 10^{-4}}{\pi\cdot 0,875}} = (15,4 \div 18,8)\cdot 10^{-2}\ \text{m} = \\ = 15,4 \div 18,8\ \text{cm},$$

unde:

$k_m = k_{Fe}k_g = 0,95\cdot 0,92 = 0,875$, iar

$k_g = 0,92$, din tabelul 3.1 a, pentru un diametru al coloanei D_c estimat orientativ între 10 și 18 cm (din valoarea S_c obținută cu relația (3.96)).

De asemenea, din același tabel, rezultă orientativ un număr de trepte pentru coloană $n_{tr} = 6$; strîngerea miezului coloanei pentru asemenea diametre se face, în mod obișnuit, prin lipire cu lac.

Îmbinarea dintre tolele coloanelor și jugurilor se face prin *întrețesere*, sub un unghi de 45°.

Lățimile treptei coloanei $a_1, a_2, \ldots, a_{ntr}$, calculate conform indicațiilor din figura 3.1 sau stabilite de proiectant după alte norme de fabricație, se

se comandă să se rotunjească fie din 5 în 5 mm, fie la alte valori, astfel încît cantitatea de deșeuri rezultată din tăierea tablei să fie minimă, iar tehnologia miezului corespunzătoare.

În cazul de față se stabilește

$$D_c = 160 \text{ mm} = 16 \text{ cm}, \qquad (3.97)$$

cu următoarele lățimi ale treptelor (v. fig. 3.1 f):

$$\begin{aligned} a_1 &\approx 0{,}96 \cdot 16 = 15{,}35 \text{ cm, rotunjit } a_1 = 15{,}5 \text{ cm};\\ a_2 &\approx 0{,}885 \cdot 16 = 14{,}15 \text{ cm, } \rightarrow a_2 = 14 \text{ cm};\\ a_3 &\approx 0{,}775 \cdot 16 = 12{,}4 \text{ cm, } \rightarrow a_3 = 12{,}5 \text{ cm};\\ a_4 &\approx 0{,}631 \cdot 16 = 10{,}1 \text{ cm, } \rightarrow a_4 = 10 \text{ cm};\\ a_5 &\approx 0{,}465 \cdot 16 = 7{,}45 \text{ cm, } \rightarrow a_5 = 7{,}5 \text{ cm};\\ a_6 &\approx 0{,}28 \cdot 16 = 4{,}48 \text{ cm, } \rightarrow a_6 = 4{,}5 \text{ cm}. \end{aligned} \qquad (3.97\text{ a})$$

Din construcția grafică la scară a secțiunii coloanei rezultă următoarele grosimi ale treptelor (fig. 3.48):

$$\begin{aligned} b_1 &= 18 \text{ mm} = 1{,}8 \text{ cm};\\ b_2 &= 20 \text{ mm} = 2 \text{ cm}; \end{aligned} \qquad (3.97\text{ b})$$

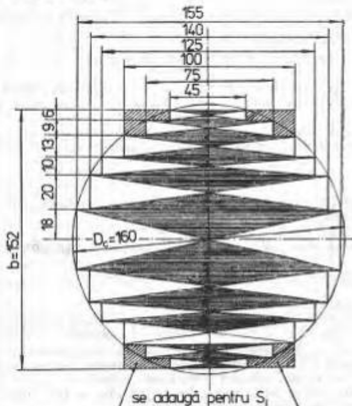


Figura 3.48. Construcția la scară a secțiunii coloanei. Părțile hașurată (din cele 4 colțuri) se adaugă la S_c, pentru a rezulta $S_i > S_c$.

$$b_3 = 10 \text{ mm} = 1 \text{ cm};$$
$$b_4 = 13 \text{ mm} = 1,3 \text{ cm};$$
$$b_5 = 9 \text{ mm} = 0,9 \text{ cm}; \quad (3.97 \text{ b})$$
$$b_6 = 6 \text{ mm} = 0,6 \text{ cm};$$
$$b = 2\sum_{i=1}^{n_{tr}} b_i = 15,2 \text{ cm}.$$

Secţiunea netă de fier a coloanei, rezultă cu relaţia (3.4 a)

$$S_c = k_{Fe} 2\sum_{i=1}^{n_{tr}} a_i b_i = 0,95 \cdot 2(15,5 \cdot 1,8 + 14 \cdot 2 + 12,5 \cdot 1 + 10 \cdot 1,3 + 7,5 \cdot 0,9 + 4,5 \cdot 0,6) \approx 173 \text{ cm}^2. \quad (3.98)$$

— *Secţiunea jugului*, se determină considerînd că jugul va avea cu două trepte mai puţin decît coloana. Astfel, dacă la secţiunea coloanei se mai adaugă cele patru suprafeţe haşurate (vezi fig. 3.48) se obţine

$$S_j = 2\, k_{Fe}[a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 + a_4(b_4 + b_5 + b_6)] = 2 \cdot 0,95[15,5 \cdot 1,8 + 14 \cdot 2 + 12,5 \cdot 1 + 10(1,3 + 0,9 + 0,6)] = 183 \text{ cm}^2, \quad (3.99)$$

ceea ce înseamnă că

$$\beta_j = \frac{S_j}{S_c} = \frac{183}{173} = 1,057$$

este în limitele indicate de relaţia (3.7).

— *Înălţimea coloanei*, conform relaţiei (3.8)

$$l_c = \frac{S_1}{100\, A e_1} = \frac{83,5 \cdot 10^4}{100 \cdot 350 \cdot 6,5} = 0,366 \text{ m} \approx 36,5 \text{ cm}, \quad (3.100)$$

unde, din tabelul 3.2 s-au ales

$$A = 350 \text{ A/cm};$$
$$B_c = 1,7 \text{ T},$$

iar t.e.m. pe spiră, conform relaţiei (3.8 b) este

$$e_1 = 4,44\, f S_c B_c = 4,44 \cdot 50 \cdot 173 \cdot 10^{-4} \cdot 1,7 = 6,5 \text{ V}.$$

— *Lăţimea ferestrei* (valoare orientativă), se determină cu relaţia (3.9 b)

$$T = M - D_c = 32 - 16 = 16 \text{ cm}, \quad (3.100 \text{ a})$$

în care, distanţa dintre coloane, conform relaţiei (3.9 a)

$$M = \alpha D_c = 2 \cdot 16 = 32 \text{ cm},$$

unde s-a considerat $\alpha \approx 2$.

Se menţionează că valorile definitive vor fi confirmate după aşezarea înfăşurărilor şi după calculul caracteristicilor transformatorului (P_k, u_k şi P_0).

— *Lungimea medie* a jugului magnetic, pentru fazele marginale, conform relației (3.9 d)

$$L_j \approx 2M + 0{,}9\, D_e = 2 \cdot 32 + 0{,}9 \cdot 16 = 78{,}4 \text{ cm.} \qquad (3.100\ \text{b})$$

Verificarea prealabilă (pentru aceste dimensiuni orientative ale miezului) a pierderilor la funcționarea în gol, conform relației (3.44):

$$P_0 \approx P_{Fe} = k_p p_{10/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} (B_c^2 G_{Fec} + B_j^2 G_{Fej}) =$$

$$= 1{,}07 \cdot 0{,}45 \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} (1{,}7^2 \cdot 145 + 1{,}61^2 \cdot 219) = 475\ \text{W}, \qquad (3.101)$$

unde:

— inducția magnetică în jug

$$B_j = \frac{\Phi}{S_j} = \frac{B_c S_c}{S_j} = \frac{B_c}{\beta_j} = \frac{1{,}7}{1{,}057} = 1{,}61\ \text{T};$$

— masa netă a fierului, conform relațiilor (3.43 b):

— pentru coloane

$$G_{Fec} = 3\, S_c L_c \gamma_{Fe} = 3 \cdot 173 \cdot 36{,}5 \cdot 7{,}65 \cdot 10^{-3} = 145\ \text{kg},$$

— pentru juguri

$$G_{Fej} = 2\, S_j L_j \gamma_{Fe} = 2 \cdot 183 \cdot 78{,}4 \cdot 7{,}65 \cdot 10^{-3} = 219\ \text{kg}.$$

Dacă pentru k_p se ia valoarea rezultată din practica de fabricație (vezi observația de la relația (3.44), atunci (considerînd $k_p = 1{,}25$) rezultă

$$P_0 = 475 \cdot \frac{1{,}25}{1{,}07} = 556\ \text{W}, \qquad (3.101\ \text{a})$$

adică apropiate de valoare impusă prin temă, ceea ce înseamnă că dimensionarea miezului, pînă în această etapă, este bine făcută.

B. **Calculul înfășurărilor**

— *T.e.m. din înfășurarea primară și secundară*, conform relațiilor (3.11 a):

$E_i \approx U_{1f} = U_{iN} = 10\,000$ V, înfășurare avînd conexiunea D;

$E_j \approx U_{jf} = \frac{U_{jl}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231$ V, înfășurare avînd conexiunea y.

— *Numărul de spire* al înfășurărilor:

— pentru *înfășurarea de înaltă tensiune*, conform relației (3.10), pentru t.e.m. nominală

$$w_i = \frac{E_i}{e_t} = \frac{10\,000}{6{,}5} \approx 1\,538 \text{ spire};$$

— numărul de spire corespunzător treptei maxime de reglaj a tensiunii, conform relației (3.10 a)

$$\Delta w_i = \frac{k' \Delta u\%}{100} w_i = \frac{5}{100} \cdot 1\,538 \approx 77 \text{ spire};$$

— numărul total de spire al înfășurării primare (de înaltă tensiune), conform relației (3.10 b)

$$w_{iT} = w_i + \Delta w_i = 1\,538 + 77 = 1\,615 \text{ spire}; \qquad (3.102)$$

— pentru *înfășurarea de joasă tensiune*, conform relației (3.10 c)

$$w_j = \frac{E_j}{e_1} = \frac{231}{6{,}5} = 35{,}53 \text{ spire.}$$

Se rotunjește w_j la numărul întreg apropiat

$$w_j = 36 \text{ spire.} \qquad (3.103)$$

Pentru a nu modifica raportul de transformare se recalculează numărul de spire al înfășurării primare, din condiția menținerii raportului de transformare, impus prin datele nominale

$$k = \frac{E_i}{E_j} = \frac{w_i}{w_j}.$$

Se obțin astfel, pentru înfășurarea de înaltă tensiune

$$w_i = kw_j = \frac{E_i}{E_j} w_j = \frac{10\,000}{231} \cdot 36 = 1\,558 \text{ spire};$$

$$\Delta w_i = \frac{k'\Delta w\%}{100} w_i = \frac{5}{100} \cdot 1\,558 \approx 78 \text{ spire.}$$

și numărul total

$$w_{iT} = w_i + \Delta w_i = 1\,558 + 78 = 1\,636 \text{ spire.} \qquad (3.103\text{ a})$$

— *Valorile definitive* ale fluxului magnetic și inducțiilor magnetice:

— fluxul magnetic util (maxim), conform relației (3.12)

$$\Phi = \frac{E_i}{4{,}44\, f w_i} = \frac{10\,000}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 1\,558} \approx 2{,}9 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}; \qquad (3.104)$$

— inducția magnetică în coloană, conform relației (3.12 a)

$$B_c = \frac{\Phi}{S_c} = \frac{2{,}9 \cdot 10^{-2}}{173 \cdot 10^{-4}} = 1{,}676 \text{ T}; \qquad (3.104\text{ a})$$

— inducția magnetică în jug, conform relației (3.12 b)

$$B_j = \frac{\Phi}{S_j} = \frac{2{,}9 \cdot 10^{-2}}{183 \cdot 10^{-4}} = 1{,}584 \text{ T}, \qquad (3.104\text{ b})$$

valori care se încadrează în limitele normale;

— t.e.m. într-o spiră, conform relației (3.12 d)

$$e_1 = \frac{E_i}{w_i} = \frac{10\,000}{1\,558} \approx 6{,}42 \text{ V/spiră.}$$

— *Curenții nominali* ai transformatorului, conform relațiilor (3.13 a) sînt:

— în înfășurarea de înaltă tensiune

$$I_i \approx \frac{S_N}{m_i U_{if}} = \frac{250 \cdot 10^3}{3 \cdot 10\,000} = 8,33 \text{ A}; \quad (3.105)$$

— în înfășurarea de joasă tensiune

$$I_j = \frac{S_N}{m_j U_{jf}} = \frac{250 \cdot 10^3}{3 \cdot 231} = 360,75 \text{ A}, \quad (3.105\text{ a})$$

unde, pentru ambele înfășurări, numărul de faze este același, adică $m_i = m_j = m = 3$.

— *Secțiunile, orientative, ale conductoarelor*, conform relațiilor (3.14):

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune

$$s_{wi} = \frac{I_i}{J_i} = \frac{8,33}{2,4} = 3,47 \text{ mm}^2;$$

— pentru înfășurarea de joasă tensiune

$$s_{wj} = \frac{I_j}{J_j} = \frac{360,75}{2,75} = 131,2 \text{ mm}^2;$$

unde, s-a considerat că înfășurările nu au aceleași condiții de răcire, deoarece înfășurarea de joasă tensiune fiind mai subțire se răcește mai bine, iar cea de înaltă tensiune fiind mai groasă și cu izolații între straturi (se ia înfășurare stratificată), se răcește mai greu.

De aceea, în conformitate și cu indicațiile din tabelul 3.2 s-a ales

$$J_i = 2,4 \text{ A/mm}^2 \text{ și } J_j = 2,75 \text{ A/mm}^2.$$

— *Dimensiunile conductoarelor*. După cum se impune prin temă, conductoarele ambelor înfășurări sînt din cupru și izolate cu hîrtie. Se aleg conductoare profilate deoarece, pentru înfășurarea de joasă tensiune, a rezultat o secțiune mare, iar pentru cea de înaltă tensiune, deși secțiunea este mică, se obține o așezare și o umplere mai bună a bobinei.

Din STAS 2873-76 (anexa 2, tabelul 2-I) se stabilesc:

— *pentru înfășurarea de înaltă tensiune*

$$CuEm\ 1,8 \times 2,12 \text{ (gros. iz. 0,3 mm)} = 3,45 \text{ mm}^2; \quad (3.106)$$

— *pentru înfășurarea de joasă tensiune*, se vor utiliza 4 fire în paralel, dimensiunile conductorului (firului) fiind corelate cu înălțimea H_b a bobinei, și cu numărul de straturi (vezi relațiile (3.110) și (3.110 a)). Se alege astfel

$$CuEm\ 4\ (4,25 \times 8) \text{ (gros. iz. 0,36 mm)} = 4 \cdot 33,1 = 132,4 \text{ mm}^2. \quad (3.106\text{ a})$$

Observație. CuEm, înseamnă „cupru electrolitic moale".

Grosimea bilaterală a izolației de hîrtie a conductorului (0,3 mm pentru î.t. și 0,36 mm pentru j.t.) s-a stabilit conform STAS 6163-76 (anexa 3, tabelul 3-III).

Rezultă astfel următoarele dimensiuni ale conductoarelor izolate:

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune

$$a' \times b' = 2{,}1 \times 2{,}42 \text{ mm}^2; \qquad (3.107)$$

— pentru înfășurarea de joasă tensiune

$$a' \times b' = 4{,}61 \times 8{,}36 \text{ mm}^2. \qquad (3.107\text{ a})$$

— *Valorile definitive* (recalculate) ale densităților de curent, conform relațiilor (3.14 c)

$$J_i = \frac{I_i}{s_{ri}} = \frac{8{,}33}{3{,}45} = 2{,}41 \text{ A/mm}^2;$$
$$J_j = \frac{I_j}{s_{rj}} = \frac{360{,}75}{132{,}4} = 2{,}72 \text{ A/mm}^2. \qquad (3.108)$$

— *Tipul și dimensiunile înfășurărilor.*

În conformitate cu indicațiile menționate în paragraful 3.3.3 B și tabelul 3.7 pentru puterea și tensiunile impuse prin temă și pentru curenții calculați, în funcție de care au rezultat forma și dimensiunile conductoarelor, se stabilesc următoarele tipuri de înfășurări:

— *înfășurarea de joasă tensiune*, va fi de tip *cilindric*, cele 4 conductoare în paralel așezîndu-se două alăturate (suprapuse axial) și două suprapuse radial. Bobina va avea (vezi relațiile (3.103) și (3.110 a)), două straturi (a cîte două conductoare suprapuse radial), între care se prevede un canal de răcire $a_{ja} = 3$ mm (figura 3.10 *c*, în care însă fiecare strat are cîte două conductoare suprapuse axial — ca în figura 3.11 și cîte două conductoare suprapuse radial ca în figura 3.12 a).

Nivelarea înălțimii bobinei se face cu ajutorul a două pene (segmente) circulare, din carton electrotehnic, de tipul celor indicate în figura 3.14;

— *înfășurarea de înaltă tensiune*, va fi de tip *stratificat* ca în figura 3.27, însă cu conductor profilat. Bobina va avea un canal axial de răcire în partea interioară (la o distanță cuprinsă între 1/3 și 2/5 din numărul total de straturi) cu lățimea $a_{ia} = 5$ mm.

Bobina de înaltă tensiune se deapănă direct peste cea de joasă tensiune, rezultînd o *înfășurare monolit*.

— *Înălțimea bobinelor* (orientativă), conform relației (3.20) și figurii 3.8

$$H_B = L_c - 2\,s_{im} = 36{,}5 - 2 \cdot 2{,}5 = 31{,}5 \text{ cm}. \qquad (3.109)$$

unde, din tabelul 3.3 pentru $U_{jN} = 0{,}4$ kV și $U_{iN} = 10$ kV, s-au stabilit, (vezi fig. 3.8):

$$s_{im} = 2{,}5 \text{ cm};$$
$$a_{mj} = 0{,}4 \text{ cm};$$
$$a_{ji} = 0{,}8 \text{ cm};$$
$$a_{ii} = 0{,}8 \text{ cm}. \qquad (3.109\text{ a})$$

Modul de așezare a înfășurărilor și izolațiilor folosite este arătat, detaliat, în figura 3.49.

— *Numărul de spire* pe un strat ;

— pentru *înfășurarea de joasă tensiune*, rezultă din relația (3.21)

$$w_{sj} = \frac{H_B - n_t h_t}{h_t k_s} - 1 = \frac{31,5}{1,672 \cdot 1,01} - 1 = 17,65 \text{ spire} \qquad (3.110)$$

în care :

$h_t = 2b' = 2 \cdot 8,36 = 16,72$ mm $= 1,672$ cm (v. fig. 3.11) ;

$k_s = 1,01$;

$n_t = 0$, deoarece fiind numai două conductoare (fire) suprapuse radial, se face o singură transpoziție, după primul strat ; fiind și două conductoare (fire) suprapuse axial, transpunerea se face fără pierderi din înălțimea bobinei (adică fără spațiu suplimentar) prin trecerea (permutarea) conductoarelor dintr-un strat suprapus axial în celălalt.

Cum s-a menționat mai sus, la stabilirea dimensiunilor conductoarelor, pentru ca bobina să aibă două straturi se stabilește

$$w_{sj} = 18 \text{ spire/strat.} \qquad (3.110 \text{ a})$$

Înălțimea bobinei de joasă tensiune rezultă, astfel, cu relația (3.21).

$$H_{Bj} = (w_{sj} + 1) h_t k_s + n_t h_t = (18 + 1) \cdot 1,672 \cdot 1,01 \approx 32 \text{ cm}, \qquad (3.111)$$

ceea ce înseamnă că pentru înfășurarea de joasă tensiune, distanța de izolație până la jugul magnetic rezultă (v. fig. 3.8)

$$s_{jm} = \frac{L_c - H_{Bj}}{2} = \frac{36,5 - 32}{2} = 2,25 \text{ cm}, \qquad (3.111 \text{ a})$$

ceea ce este suficient (din tabelul 3.3 pentru $U_{jN} \leq 1$ kV, rezultă că se poate lua $s_{jm} = 2$ cm) ;

— pentru *înfășurarea de înaltă tensiune*, numărul de spire pe un strat, rezultă din relația (3.34) în care se consideră însă dimensiunile conductorului profilat

$$w_{si} = \frac{H_B}{b'} - 1 = \frac{31,5}{0,242} - 1 = 129 \text{ spire/strat.} \qquad (3.112)$$

Numărul de straturi

$$n_{si} = \frac{w_{iT}}{w_{si}} = \frac{1\,636}{129} = 12,68 \text{ straturi,}$$

ceea ce înseamnă că înfășurarea de înaltă tensiune va avea 13 straturi din care 12 straturi cu 129 spire și ultimul strat cu 88 spire.

Tensiunea între straturi, conform relației (3.33)

$$U_s = 2 w_{si} e_1 = 2 \cdot 129 \cdot 6,42 \approx 1\,656 \text{ V}, \qquad (3.113)$$

pentru care din tabelul 3.6 rezultă o grosime a izolației dintre straturi

$$\delta_s = 3 \times 0,12 = 0,36 \text{ mm}, \qquad (3.113 \text{ a})$$

izolația depășind capetele bobinei cu 1,6 mm în fiecare parte.

— *Grosimea înfăşurărilor*, rezultă :

— pentru *înfăşurarea de joasă tensiune*, conform relaţiei (3.21 a) cu $\delta_{is} = 0$

$$a_j = n_{sj} a_s + n_a a_{ja} + (n_s - n_a - 1)\delta_{is} = 2 \cdot 9{,}22 + 1 \cdot 3 + (2 - 1 - 1)\delta_{is} \approx$$
$$\approx 21{,}5 \text{ mm} = 2{,}15 \text{ cm}, \qquad (3.114)$$

unde :

$$a_s = 2a' = 2 \cdot 4{,}61 = 9{,}22 \text{ mm, este grosimea stratului ;}$$

— pentru *înfăşurarea de înaltă tensiune*, conform relaţiei (3.35 a) folosind grosimea a' a conductorului, în locul lui d'

$$a_i = n_{si} a' + a_{ia} + (n_s - 2)\delta_s = 13 \cdot 2{,}1 + 5 + (13 - 2) \cdot 0{,}36 = 36{,}26 \text{ mm} \approx$$
$$\approx 36{,}5 \text{mm} = 3{,}65 \text{ cm}. \qquad (3.114 \text{ a})$$

— *Lăţimea ferestrei* transformatorului, conform relaţiei (3.37) rezultă

$$T = 2(a_{mj} + a_j + a_{ji} + a_i) + a_{ii} = 2(0{,}4 + 2{,}15 + 0{,}8 + 3{,}65) + 0{,}8 =$$
$$= 14{,}8 \text{ cm} \approx 15 \text{ cm}, \qquad (3.115)$$

faţă de 16 cm cît fusese estimată cu relaţia (3.100 a).

C. Calculul pierderilor şi curentului de funcţionare în gol

— *Rezistenţele înfăşurărilor*, pe fază, conform relaţiei (3.38), avînd conductoare din cupru şi clasă de izolaţie A (transformator în ulei) :

— pentru *înfăşurarea de joasă tensiune*

$$R_j = \rho_{Cu\,75°} \cdot \frac{w_j l_{medj}}{s_{cj}} = 0{,}022 \cdot \frac{36 \cdot 0{,}597}{132{,}4} = 3{,}57 \cdot 10^{-3} \ \Omega, \qquad (3.116)$$

în care :

$$\rho_{Cu\,75°} = 0{,}022 \ \Omega \ \text{mm}^2/\text{m} ;$$

$$l_{medj} = \pi D_{mj} = \pi \cdot 19 = 59{,}7 \text{ cm} = 0{,}597 \text{ m}, \qquad (3.116 \text{ a})$$

unde, diametrul mediu, conform figurii 3.8 şi relaţiei (3.39 c)

$$D_{mj} = D_c + 2\,a_{mj} + a_j = 16 + 2 \cdot 0{,}4 + 2{,}15 = 18{,}95 \text{ cm} \approx 19 \text{ cm} ;$$

— pentru *înfăşurarea de înaltă tensiune*

$$R_i = \rho_{Cu\,75°} \cdot \frac{w_i l_{medi}}{s_{ci}} = 0{,}022 \cdot \frac{1\,558 \cdot 0{,}83}{3{,}45} \approx 8{,}25 \ \Omega, \qquad (3.117)$$

în care, conform relaţiei (3.39 b)

$$l_{medi} = \pi D_{mi} = \pi \cdot 26{,}35 = 82{,}78 \text{ cm} \approx 0{,}83 \text{ m}, \qquad (3.117 \text{ a})$$

unde, diametrul mediu, conform figurii 3.8 şi relaţiei (3.39 c)

$$D_{mi} = D_c + 2(a_{mj} + a_j + a_{ji}) + a_i = 16 + 2(0{,}4 + 2{,}15 + 0{,}8) +$$
$$+ 3{,}65 = 26{,}35 \text{ cm}.$$

— *Pierderile în înfăşurări*, conform relaţiei (3.40):

— pentru *înfăşurarea de joasă tensiune*

$$P_{wj} = mk_{rj}R_jI_j^2 = 3\cdot 1{,}032\cdot 3{,}57\cdot 10^{-3}\cdot 360{,}75^2 = 1\,438{,}4\ \text{W}, \quad (3.118)$$

unde, factorul de majorare a pierderilor în curent alternativ, conform relaţiei (3.40 b)

$$k_{rj} = 1 + 1{,}73\,\alpha_p^2\left(\frac{f}{\rho\cdot 10^4}\right)^2 a^4(m_s^2 - 0{,}2) =$$

$$= 1 + 1{,}73\cdot 0{,}84^2\left(\frac{50}{0{,}022\cdot 10^4}\right)^2\cdot 0{,}425^4(4^2 - 0{,}2) = 1{,}032, \quad (3.118\ \text{a})$$

în care:

$a = 0{,}425$ cm; $b = 0{,}8$ cm, sînt dimensiunile conductorului de joasă tensiune;

$\rho = \rho_{Cu\,75°} = 0{,}022\ \Omega\ \text{mm}^2/\text{m}$;

$\alpha_p = k_R\dfrac{bn}{H_{Bj}} = 0{,}934\cdot\dfrac{0{,}8\cdot 36}{32} = 0{,}84$ conform relaţiei (3.40 c);

coeficientul lui Rogowski, conform relaţiei (3.49 c) fiind,

$$k_R = 1 - \frac{a_j + a_i + a_{ji}}{\pi H_{Bj}} = 1 - \frac{2{,}15 + 3{,}65 + 0{,}8}{\pi\cdot 32} = 0{,}934; \quad (3.118\ \text{b})$$

$n = 2w_{sj} = 2\cdot 18 = 36$ conductoare pe înălţimea bobinei, deoarece conductoarele în paralel sînt cîte două suprapuse axial;

$m_s = 4$ deoarece, la cele două straturi ale bobinei, conductoarele în paralel sînt şi cîte două suprapuse radial;

— pentru *înfăşurarea de înaltă tensiune*

$$P_{wi} = mk_{ri}R_iI_i^2 = 3\cdot 1{,}01\cdot 8{,}25\cdot 8{,}33^2 = 1\,734{,}5\ \text{W}, \quad (3.119)$$

unde, factorul de majorare a pierderilor în curent alternativ, conform relaţiei (3.40 b)

$$k_{ri} = 1 + 1{,}73\,\alpha_p^2\left(\frac{f}{\rho\cdot 10^4}\right)^2 a^4(m_s^2 - 0{,}2) =$$

$$= 1 + 1{,}73\cdot 0{,}81^2\left(\frac{50}{0{,}022\cdot 10^4}\right)^2\cdot 0{,}18^4\cdot(13^2 - 0{,}2) = 1{,}01, \quad (3.119\ \text{a})$$

în care:

$a = 0{,}18$ cm; $b = 0{,}212$ cm, sînt dimensiunile conductorului de înaltă tensiune;

$$\rho = \rho_{Cu\,75°} = 0{,}022\ \Omega\text{mm}^2/\text{m};$$

$$\alpha_p = k_R\frac{bn}{H_{Bi}} = 0{,}933\frac{0{,}212\cdot 129}{31{,}5} = 0{,}81; \quad (3.119\ \text{b})$$

coeficientul lui Rogowski, pentru $H_{Bi} = 31{,}5$ cm rezultă

$k_R = 0{,}933$, adică practic identic cu cel anterior (pentru joasă tensiune);

$n = w_{si} = 129$ conductoare pe înălţimea bobinei;

$m_s = n_{si} = 13$ conductoare pe grosimea bobinei.

— *Densitățile de suprafață* ale pierderilor în înfășurări:

— pentru *înfășurarea de joasă tensiune*, conform relației (3.41)

$$q_j = \frac{P_{wj}}{cS_{wj}} = \frac{1\,438{,}4}{3 \cdot 0{,}61} = 786\ \mathrm{W/m^2}, \tag{3.120}$$

unde:

$$c = m = 3 \text{ coloane};$$

$$S_{wj} = 0{,}8 \cdot \pi(D_{ij} + 2D_{a2} + D_{ej})H_{Bj} = 0{,}8 \cdot \pi(16{,}8 + 2 \cdot 19 + 21{,}1) \cdot 32 = \\ = 6\,104\ \mathrm{cm^2} \approx 0{,}61\ \mathrm{m^2}, \tag{3.120 a}$$

în care (fig. 3.8):

0,8 ține cont de reducerea suprafeței de răcire de către distanțori;

$D_{ij} = D_c + 2a_{mj} = 16 + 2 \cdot 0{,}4 = 16{,}8$ cm, este diametrul interior al înfășurării de joasă tensiune;

$D_{ej} = D_{ij} + 2a_j = 16{,}8 + 2 \cdot 2{,}15 = 21{,}1$ cm, este diametrul exterior al înfășurării de joasă tensiune;

— pentru *înfășurarea de înaltă tensiune*, conform relației (3.41 a)

$$q_i = \frac{P_{wi}}{cS_{wi}} = \frac{1\,734{,}5}{3 \cdot 0{,}8772} = 659\ \mathrm{W/m^2}, \tag{3.121}$$

unde:

$$S_{wi} = \pi[0{,}8(D_{ii} + 2D'_{m1}) + D_{ei}]H_{Bi} = \pi[0{,}8(22{,}7 + 2 \cdot 25{,}3) + 30]31{,}5 \approx \\ \approx 8\,772\ \mathrm{cm^2} = 0{,}8772\ \mathrm{m^2}, \tag{3.121 a}$$

în care (fig. 3.8):

$D_{ii} = D_{m1} - a_i + 26{,}35 - 3{,}65 = 22{,}7$ cm, este diametrul interior al înfășurării de înaltă tensiune;

$D'_{m1} = D_{ii} + 2n'_s a' = a_{ie} = 22{,}7 + 2 \cdot 5 \cdot 0{,}21 + 0{,}5 = 25{,}3$ cm, este diametrul mediu al canalului de răcire, care se prevede spre interiorul grosimii înfășurării de înaltă tensiune la cca. 1/3 din a_i, adică după $n'_s = 5$ straturi din cele 13 straturi cîte are înfășurarea;

$D_{ei} = D_{m1} + a_i = 26{,}35 + 3{,}65 = 30$ cm, este diametrul exterior al înfășurării de înaltă tensiune; această suprafață este spălată în întregime de uleiul de răcire.

Atît q_j cît și q_i se încadrează în limitele normale.

— *Pierderile electrice totale*, sau pierderile la funcționarea în scurtcircuit la curenții nominali, conform relației (3.41 b)

$$P_{kN} = P_{wj} + P_{wi} = 1\,438{,}4 + 1\,734{,}5 \approx 3\,173\ \mathrm{W}, \tag{3.122}$$

valoare, care se încadrează în limitele admise conform STAS 1703/7-80, abaterea trebuind să fie de + 10% din P_{kN}, impuse prin temă (vezi tabelul 2.2).

Observație: Înainte de determinarea maselor înfășurărilor, a pierderilor și curentului la funcționarea în gol, este recomandabil a se proceda la verificarea încadrării în limitele admisibile a tensiunii de scurtcircuit, adică a verifica dacă dimensiunile stabilite pînă acum sînt bune sau nu.

— *Componenta activă* a tensiunii de scurtcircuit, conform relației (3.48)

$$u_{ka} = \frac{P_{kN}}{S_N} 100 = \frac{3\,173}{250 \cdot 10^3} \cdot 100 = 1{,}269\%. \qquad (3.123)$$

— *Componenta reactivă* a tensiunii de scurtcircuit, conform relației (3.49)

$$u_{kr} = \frac{2\pi\mu_0 f w_1 I_1 l_m \delta' k_q}{e_1 H_{b1}} k_R \cdot 100 =$$

$$= \frac{2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 1\,558 \cdot 8{,}33 \cdot 0{,}7335 \cdot 2{,}93 \cdot 1}{6{,}42 \cdot 32} \cdot 0{,}934 \cdot 100 = 5\% \qquad (3.123\ a)$$

unde:
conform relației (3.49 a)

$$\delta' = a_{jt} + \frac{a_{je} + a_{jt}}{4} + \frac{a_j + a_i}{3} = 0{,}8 + \frac{0{,}3 + 0{,}5}{4} + \frac{2{,}15 + 3{,}65}{3} = 2{,}93 \text{ cm};$$

conform relației (3.49 b)

$$l_m = \pi\left[D_e + 2a_{mj} + a_{jt} + \frac{a_i + a_{ie} + 3(a_j + a_{je})}{2}\right] =$$

$$= \pi\left[16 + 2 \cdot 0{,}4 + 0{,}8 + \frac{3{,}65 + 0{,}5 + 3(2{,}15 + 0{,}3)}{2}\right] = 73{,}35 \text{ cm} = 0{,}7335 \text{ m};$$

$$k_R = 0{,}934 \text{ (v. relația (3.118 b))};$$

conform relației (3.49 d)

$$k_q = 1 + \frac{x^2 H_b}{r\delta' k_R} = 1 + \frac{0{,}0156^2 \cdot 32}{3 \cdot 2{,}93 \cdot 0{,}934} \approx 1.$$

în care, conform figurii 3.40 *c*

$$x = \frac{H_x}{H_b} = \frac{0{,}5}{32} = 0{,}0156$$

cu

$$H_x = H_{bj} - H_{bi} = 32 - 31{,}5 = 0{,}5 \text{ cm};$$

$$r = 3.$$

— *Tensiunea de scurtcircuit*, conform relației (3.50 c)

$$u_k = \sqrt{u_{ka}^2 + u_{kr}^2} = \sqrt{1{,}269^2 + 5^2} = 5{,}16\%. \qquad (3.124)$$

Deoarece valoarea obținută nu se încadrează în abaterile limită admise de STAS 1703/1-80 (vezi tabelul 2.2), care sînt de $\pm 10\%$ din $u_{kN} = 6\%$ impus prin temă (valoarea calculată trebuie să fie cuprinsă între limitele 5,4÷6,6%), se vor schimba dimensiunile conductoarelor, astfel încît fereastra transformatorului (deci și bobinele), să rezulte cu o înălțime mai mică și o lățime mai mare.

Se reiau astfel din nou etapele de calcul, de la relațiile (3.106), toate considerațiile și explicațiile anterioare rămînînd valabile.

— *Dimensiunile conductoarelor* :

— pentru înfăşurarea de înaltă tensiune se menţine acelaşi conductor ca anterior (vezi relaţia (3.106))

$$CuEm\ 1{,}8 \times 2{,}12\ (\text{gros. iz. } 0{,}3\ \text{mm}) = 3{,}45\ \text{mm}^2; \qquad (3.125)$$

$$a' \times b' = 2{,}1 \times 2{,}42\ \text{mm}^2;$$

— pentru înfăşurarea de joasă tensiune (tot cu 4 fire în paralel)

$$CuEm\ 4(4{,}75 \times 7{,}1)\ (\text{gros. iz. } 0{,}36\ \text{mm}) = 4 \cdot 32{,}9 = 131{,}6\ \text{mm}^2; \qquad (3.125\ a)$$

$$a' \times b' = 5{,}11 \times 7{,}46\ \text{mm}^2.$$

— *Valorile definitive*, ale densităţilor de curent

$$J_i = \frac{I_i}{s_{ci}} = \frac{8{,}33}{3{,}45} = 2{,}41\ \text{A/mm}^2;$$

$$J_j = \frac{I_j}{s_{cj}} = \frac{360{,}75}{131{,}6} = 2{,}74\ \text{A/mm}^2. \qquad (3.125\ b)$$

— *Tipul şi dimensiunile înfăşurărilor* se stabilesc identic ca şi în varianta anterioară.

Înălţimea bobinei de joasă tensiune (vezi relaţia (3.111)), va fi:

$$H_{Bj} = (w_s + 1)h_s k_z + n_j h_s = (18 + 1) \cdot 1{,}492 \cdot 1{,}01 = 28{,}63\ \text{cm} \approx$$

$$\approx 29\ \text{cm}, \qquad (3.126)$$

unde noul h_s (vezi relaţia (3.110)) este

$$h_s = 2b' = 2 \cdot 7{,}46 = 14{,}92\ \text{mm} = 1{,}492\ \text{cm}.$$

— *Înălţimea ferestrei*, pentru aceleaşi distanţe de izolaţie ca în relaţiile (3.109 a), rezultă din relaţia (3.109)

$$L_c = H_B + 2s_{im} = 29 + 2 \cdot 2{,}5 = 34\ \text{cm}, \qquad (3.126\ a)$$

unde s-a considerat $s_{jm} = s_{im} = 2{,}5$ cm, pentru a rezulta bobinele cu aceeaşi înălţime, deşi se putea lua s_{jm} mai mic (vezi relaţia (3.111 a)).

— *Numărul de spire pe un strat* :

— pentru înfăşurarea de joasă tensiune, rămîne acelaşi număr dat de relaţia (3.110 a), adică

$$w_{sj} = 18\ \text{spire/strat}. \qquad (3.127)$$

Pentru cele $w_j = 36$ spire, rezultă că bobina va avea tot două straturi cu un canal axial $a_{ja} = 3$ mm, între straturi;

— pentru înfăşurarea de înaltă tensiune (vezi relaţia (3.112))

$$w_{si} = \frac{H_B}{b'} - 1 = \frac{29}{0{,}242} - 1 = 118{,}83\ \text{spire/strat}.$$

Se stabilesc

$$w_{si} = 118\ \text{spire/strat}. \qquad (3.127\ a)$$

Numărul de straturi

$$n_{si} = \frac{w_{iT}}{w_{si}} = \frac{1\,636}{118} = 13,86 \text{ straturi},$$

ceea ce înseamnă că înfăşurarea de înaltă tensiune va avea

$$n_{si} = 14 \text{ straturi}, \qquad (3.127\ b)$$

din care 13 straturi cu 118 spire şi ultimul strat cu 102 spire.

Tensiunea între straturi (vezi relaţia (3.113)), rezultă

$$U_s = 2w_{si}e_1 = 2 \cdot 118 \cdot 6,42 \approx 1\,151 \text{ V}, \qquad (3.127)$$

rezultînd aceeaşi grosime a izolaţiei dintre straturi, $\delta_s = 0,36$ mm cu cea din relaţia (3.113 a) şi aceeaşi depăşire a capetelor bobinei cu 1,6 mm în fiecare parte.

— *Grosimea înfăşurărilor*, rezultă:

— pentru *înfăşurarea de joasă tensiune* (vezi relaţia (3.114))

$$a_j = n_{sj}a_s + n_a a_{ja} + (n_s - n_a - 1)\delta_{iz} =$$
$$= 2 \cdot 10,22 + 1 \cdot 3 + (2 - 1 - 1)\delta_{iz} = 23,44 \text{ mm} \approx 2,35 \text{ cm}, \qquad (3.128)$$

unde

$a_s = 2a' = 2 \cdot 5,11 = 10,22$ mm, este noua grosime a stratului;

— pentru *înfăşurarea de înaltă tensiune* (vezi relaţia (3.114 a))

$$a_i = n_{si}a' + a_{ia} + (n_{si} - 2)\delta_s =$$
$$= 14 \cdot 2,1 + 5 + (14 - 2) \cdot 0,36 = 38,72 \text{ mm} \approx 3,9 \text{ cm}. \qquad (3.128\ a)$$

Lăţimea ferestrei transformatorului (vezi relaţia (3.115))

— *Rezistenţele înfăşurărilor* pe fază:

$$T = 2(a_{mj} + a_j + a_{ji} + a_i) + a_{ii} =$$
$$= 2(0,4 + 2,35 + 0,8 + 3,9) + 0,8 = 15,7 \text{ cm} \approx 16 \text{ cm}, \qquad (3.129)$$

adică valoarea care fusese estimată cu relaţia (3.100 a).

D. Recalcularea pierderilor în înfăşurări şi în fier şi a curentului de funcţionare în gol

— *Rezistenţele înfăşurărilor* pe fază:

— pentru *înfăşurarea de joasă tensiune* (vezi relaţia (3.116))

$$R_j = \rho_{Cu\,75°} \frac{w_j l_{medj}}{s_{cj}} = 0,022\ \frac{36 \cdot 0,601}{131,6} = 3,61 \cdot 10^{-3}\ \Omega, \qquad (3.130)$$

unde:

$$l_{medj} = \pi D_{m2} = \pi \cdot 19,15 = 60,1 \text{ cm} = 0,601 \text{ m},$$

cu

$$D_{m2} = D_c + 2a_{mj} + a_j = 16 + 2 \cdot 0,4 + 2,35 = 19,15 \text{ cm};$$

— pentru *înfășurarea de înaltă tensiune* (vezi relația (3.117))

$$R_i = \rho_{Cu\,75^\circ} \frac{m_i l_{med\,i}}{s_{ci}} = 0{,}022 \frac{1\,558 \cdot 0{,}848}{3{,}45} = 8{,}42\ \Omega. \qquad (3.130\ a)$$

unde:

$$l_{med\,i} = \pi D_{m1} = \pi \cdot 27 = 84{,}8\ \text{cm} = 0{,}848\ \text{m},$$

cu

$$D_{m1} = D_i + 2(a_{0j} + a_j + a_{ji}) + a_i = 16 + 2(0{,}4 + 2{,}35 + 0{,}8) + 3{,}9 = 27\ \text{cm}.$$

— *Pierderile în înfășurări*:

— în *înfășurarea de joasă tensiune* (vezi relația (3.118))

$$P_{wj} = m k_{rj} R_j I_j^2 = 3 \cdot 1{,}047 \cdot 3{,}61 \cdot 10^{-3} \cdot 360{,}75^2 = 1\,475{,}6\ \text{W}, \qquad (3.131)$$

unde, pe baza relațiilor (3.118 a și b):

$$k_{rj} = 1 + 1{,}73\,\alpha_p^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4}\right)^2 a^4 (m_r^2 - 0{,}2) =$$

$$= 1 + 1{,}73 \cdot 0{,}812^2 \left(\frac{50}{0{,}022 \cdot 10^4}\right)^2 \cdot 0{,}475^4 (4^2 - 0{,}2) = 1{,}047 \qquad (3.131\ a)$$

și în care:

$a = 0{,}475$ cm; $b = 0{,}71$ cm;

$$k_R = 1 - \frac{a_j + a_i + a_{ji}}{\pi H_B} = 1 - \frac{2{,}35 + 3{,}9 + 0{,}8}{\pi \cdot 29} = 0{,}922; \qquad (3.131\ b)$$

$$\alpha_p = k_R \frac{bn}{H_B} = 0{,}922 \cdot \frac{0{,}71 \cdot 36}{29} = 0{,}812;$$

— în *înfășurarea de înaltă tensiune* (vezi relația (3.119))

$$P_{wi} = m k_{ri} R_i I_i^2 = 3 \cdot 1{,}01 \cdot 8{,}42 \cdot 8{,}33^2 = 1\,770{,}3\ \text{W}, \qquad (3.132)$$

unde, pe baza relațiilor (3.119 a și b)

$$k_{ri} = 1 + 1{,}73\,\alpha_p^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4}\right)^2 a^4 (m_r^2 - 0{,}2) =$$

$$= 1 + 1{,}73 \cdot 0{,}795^2 \left(\frac{50}{0{,}022 \cdot 10^4}\right)^2 \cdot 0{,}18^4 (14^2 - 0{,}2) \approx 1{,}01,$$

în care:

$a = 0{,}18$ cm; $b = 0{,}212$ cm;

$n = w_{si} = 118$ conductoare/înălțimea bobinei;

$$\alpha_p = k_R \frac{bn}{H_B} = 0{,}922 \frac{0{,}212 \cdot 118}{29} = 0{,}795;$$

$m_r = n_{si} = 14$ conductoare de grosimea bobinei.

— *Pierderile electrice totale*, sau pierderile la funcţionarea în scurtcircuit la curenţii nominali (vezi relaţia (3.122))

$$P_{kN} = P_{wj} + P_{wi} = 1\,475{,}6 + 1\,770{,}3 \approx 3\,246 \text{ W}, \qquad (3.133)$$

valoare care se încadrează în limitele admise (vezi tabelul 2.2).

— *Densităţile de suprafaţă* ale pierderilor din înfăşurări:

— pentru *înfăşurarea de joasă tensiune* (vezi relaţia (3.120))

$$q_j = \frac{P_{wj}}{cS_{wj}} = \frac{1\,475{,}6}{3\cdot 0{,}5583} = 881 \text{W/m}^2, \qquad (3.134)$$

unde (vezi relaţia (3.120 a))

$$S_{wj} = 0{,}8\cdot\pi(D_{ij} + 2D_{m2} + D_{ej})H_B = 0{,}8\cdot\pi\cdot(16{,}8 + 2\cdot 19{,}15 + 21{,}5)\cdot 29 = 5\,583 \text{ cm}^2 = 0{,}5583 \text{ m}^2, \qquad (3.134\text{ a})$$

cu

$$D_{ej} = D_{ij} + 2a_j = 16{,}8 + 2\cdot 2{,}35 = 21{,}5 \text{ cm};$$

— pentru *înfăşurarea de înaltă tensiune* (vezi relaţia (3.121))

$$q_i = \frac{P_{wi}}{cS_{wi}} = \frac{1\,770{,}3}{3\cdot 0{,}8245} = 715 \text{ W/m}^2, \qquad (3.135)$$

unde (v. relaţia (3.121 a)):

$$S_{wi} = \pi[0{,}8(D_{ii} + 2D'_{m1}) + D_{ei}]H_B =$$

$$= \pi[0{,}8(23{,}1 + 2\cdot 25{,}7) + 30{,}9]29 = 8\,245 \text{ cm}^2 = 0{,}8245 \text{ m}^2, \qquad (3.135\text{ a})$$

în care:

$$D_{ii} = D_{m1} - a_i = 27 - 3{,}9 = 23{,}1 \text{ cm};$$

$$D'_{m1} = D_{ii} + 2n'_s a' + a_{is} = 23{,}1 + 2\cdot 5\cdot 0{,}21 + 0{,}5 = 25{,}7 \text{ cm},$$

considerînd, ca şi anterior, canalul de răcire la cca. 1/3 din a_i (spre interior), adică după $n'_s = 5$ straturi din cele 14 straturi cîte are înfăşurarea de înaltă tensiune;

$$D_{ei} = D_{m1} + a_i = 27 + 3{,}9 = 30{,}9 \text{ cm}.$$

Cum se observă, atît q_j cît şi q_i se încadrează în limitele normale indicate la paragraful 3.4.1 (vezi relaţiile (3.41) şi (3.41 a)).

— *Masele conductoarelor înfăşurărilor* se determină cu relaţia (3.42):

— pentru *înfăşurare de joasă tensiune*

$$G_{wj} = \gamma_{Cu} s_{wj} w_j l_{medj} = 8{,}9\cdot 10^{-3}\cdot 1{,}316\cdot 36\cdot 60{,}1 = 25{,}4 \text{ kg}; \qquad (3.136)$$

— pentru *înfăşurare de înaltă tensiune*

$$G_{wi} = \gamma_{Cu} s_{wi} w_{i2} l_{medi} = 8{,}9\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}0345\cdot 1\,636\cdot 84{,}8 = 42{,}6 \text{ kg}. \qquad (3.136\text{ a})$$

— *Dimensiunile definitive* ale miezului magnetic sînt deci (vezi fig. 3.2):
$D_c = 16$ cm (vezi relația (3.97)), cu dimensiunile treptelor conform figurii 3.48, pentru care au rezultat:
$S_c = 173$ cm^2 (vezi relația (3.98));
$S_j = 183$ cm^2 (vezi relația (3.99));
$L_c = 34$ cm (vezi relația (3.126 a));
$T = 16$ cm (vezi relația (3.129));
$M = T + D_c = 16 + 16 = 32$ cm;
$L_j = 2M + 0{,}9D_c = 78{,}4$ cm (vezi relația (3.100 b)).

— *Masa netă a fierului*, conform relațiilor (3.43 b):

— pentru coloane

$$G_{Fec} = 3S_cL_c\gamma_{Fe} = 3 \cdot 173 \cdot 34 \cdot 7{,}65 \cdot 10^{-3} = 135 \text{ kg}; \qquad (3.137)$$

— pentru juguri

$$G_{Fej} = 2S_jL_j\gamma_{Fe} = 2 \cdot 183 \cdot 78{,}4 \cdot 7{,}65 \cdot 10^{-3} = 219 \text{ kg}. \qquad (3.137\text{ a})$$

— *Pierderile în fier* care reprezintă și pierderile la funcționarea în gol, conform relației (3.44) — a se vedea și relațiile (3.101) și (3.104 a și b)

$$P_0 \approx P_{Fe} = k_p p_{10/50}\left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}(B_c^2G_{Fec} + B_j^2G_{Fej}) =$$

$$= 1{,}07 \cdot 0{,}45\left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot (1{,}676^2 \cdot 135 + 1{,}584^2 \cdot 219) = 447 \text{ W}. \qquad (3.138)$$

Dacă pentru k_p se folosește valoarea din practica de fabricație a transformatoarelor (vezi observația de la relația (3.44)), atunci (considerînd $k_p = 1{,}25$) rezultă

$$P_0 = 447\,\frac{1{,}25}{1{,}07} \approx 522 \text{ W}, \qquad (3.138\text{ a})$$

valoare care se încadrează în toleranțele impuse de STAS 1 703/1-80 (v. tabelul 2.2).

— *Componenta activă*, a curentului de funcționare în gol, conform relației (3.45)

$$I_{0a} = \frac{P_{Fe}}{mU_{1f}} = \frac{522}{3 \cdot 10\,000} = 0{,}0174 \text{ A}. \qquad (3.139)$$

— *Componenta reactivă*, a curentului de funcționare în gol, conform relației (3.46 b)

$$I_{0r} = I_\mu = \frac{H_cL_c + H_jL_j + n_\delta\dfrac{B_j}{\mu_0}\delta_i}{\sqrt{2}w_i} =$$

$$= \frac{2{,}5 \cdot 34 + 1 \cdot 78{,}4 + 2\dfrac{1{,}18}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0{,}025 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{2} \cdot 1\,558} = 0{,}096 \text{ A}, \qquad (3.139\text{ a})$$

în care $n_\delta'' = 2$, iar din anexa 4 rezultă:

— pentru $B_c = 1{,}676$ T $\rightarrow H_c = 2{,}5$ A/cm;

— pentru $B_j = 1{,}584$ T $\rightarrow H_j = 1$ A/cm;

— pentru unghiul de îmbinare dintre tolele coloanelor și jugurilor $\alpha = 45$ rezultă :

$\delta_i \approx 0{,}025 \cdot 10^{-3}$ m ;

$B_i = B_c \cos\alpha = 1{,}676 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 1{,}18$ T.

— *Curentul (total)*, la funcționarea în gol a transformatorului (valoare eficace), conform relației (3.47)

$$I_{10} = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} = \sqrt{0{,}0174^2 + 0{,}096^2} = 0{,}0975 \text{ A} \qquad (3.139 \text{ b})$$

sau în %, conform relației (3.47 a)

$$I_{10}[\%] = \frac{I_{10}}{I_1}100 = \frac{0{,}0975}{8{,}33}100 \approx 1{,}17\%. \qquad (3.139 \text{ c})$$

E. Tensiunea de scurtcircuit

— *Componenta activă* a tensiunii de scurtcircuit, conform relației (3.48) — vezi și relația (3.123)

$$u_{ka} = \frac{P_{kN}}{S_N}100 = \frac{3\,246}{250 \cdot 10^3}100 = 1{,}298\%. \qquad (3.140)$$

— *Componenta reactivă* a tensiunii de scurtcircuit, conform relației (3.49) — vezi și relația (3.123 a)

$$u_{kr} = \frac{2\pi\mu_0 f w_1 I_1 l_m \delta' k_q}{e_1 H_B} k_R 100 =$$

$$= \frac{2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 1\,558 \cdot 8{,}33 \cdot 0{,}747 \cdot 3{,}08 \cdot 1}{6{,}42 \cdot 29} 0{,}922 \cdot 100 = 5{,}83\%,$$

unde :

— conform relației (3.49 a)

$$\delta' = a_{j i} + \frac{a_{je} + a_{ie}}{4} + \frac{a_j + a_i}{3} = 0{,}8 + \frac{0{,}3 + 0{,}5}{4} + \frac{2{,}35 + 3{,}9}{3} = 3{,}08 \text{ cm} ;$$

— conform relației (3.49 b)

$$l_m = \pi\left[D_e + 2a_{mj} + a_{ji} + \frac{a_i + a_{ie} + 3(a_j + a_{je})}{2}\right] =$$

$$= \pi\left[16 + 2 \cdot 0{,}4 + 0{,}8 + \frac{3{,}9 + 0{,}5 + 3(2{,}35 + 0{,}3)}{2}\right] = 74{,}7 \text{ cm} = 0{,}747 \text{ m} ;$$

$k_R = 0{,}922$ (vezi relația (3.131 b)) ;

$k_q \approx 1$, deoarece înălțimile bobinelor de joasă și înaltă tensiune sînt aproximativ egale.

— *Tensiunea de scurtcircuit*, conform relației (3.50 c) — vezi și relația (3.124)

$$u_k = \sqrt{u_{ka}^2 + u_{kr}^2} = \sqrt{1{,}298^2 + 5{,}83^2} = 5{,}97\% \qquad (3.140 \text{ b})$$

valoare care se încadrează în abaterile admise de STAS 1703/1-80 (v. tabelul 2.2), care sînt de $\pm 10\%$ din u_{kN}.

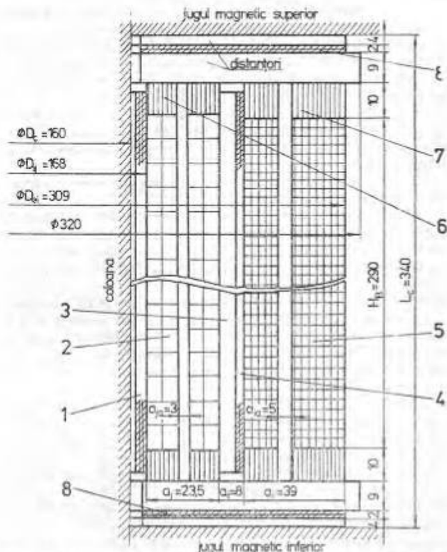


Figura 3.49. Secţiune transversală prin înfăşurările transformatorului trifazat în ulei de 250 kVA, 10/0,4 kV: 1 — cilindru izolant gros de 3 mm; 2 — înfăşurarea de j.t.; 3 — pană de distanţă (pertinax); 4 — izolaţie de carton gros de 2 mm; 5 — înfăşurare de î.t.; 6 — izolaţie de egalizare înfăşurare de j.t. (trafoboard); 7 — izolaţie de egalizare înfăşurare de î.t. (trafoboard); 8 — inel izolant cu distanţori.

Rezultă deci că pentru noile dimensiuni ale conductorului înfășurării de joasă tensiune, pentru care au rezultat și alte dimensiuni ale înfășurărilor și ferestrei transformatorului, tensiunea de scurtcircuit s-a încadrat în limitele admise. Aceste dimensiuni se consideră deci ca fiind definitive, bineînțeles dacă ele vor corespunde și la verificările mecanice și termice.

În figura 3.49, este reprezentată, la scară, secțiunea transversală prin înfășurările transformatorului, din exemplul considerat, din care reiese atît modul concret de realizare a izolațiilor pentru distanțele prevăzute, cît și forma constructivă cu dimensiunile reale ale înfășurărilor.

Întreaga înfășurare (*j.t.* + *î.t.*) este realizată din punct de vedere tehnologic, sub formă de *înfășurare monolit*, adică înfășurarea de î.t. se deapănă (bobinează) direct peste înfășurarea de j.t., evident cu prevederea penelor 3 și izolației 4 (fig. 3.49).

Spirele de reglaj sînt prevăzute la exteriorul înfășurării de înaltă tensiune, pe ultimele două straturi.

În cazul transformatoarelor la care tensiunile nominale ale înfășurărilor sînt egale sau mai mari ca 20 kV, atunci pentru creșterea rigidității dielectrice a distanțelor de izolație indicate în tabelul 3.3, se prevăd la acea înfășurare (sau la ambele înfășurări, dacă ambele tensiuni $\geq$ 20 kV), măsuri constructive suplimentare.

Astfel, în figura 3.50, sînt prevăzuți la înfășurarea de înaltă tensiune, care are U_{iN} = 30 kV, atît *cilindrul izolant moale* (poz. 7) cu grosimea de 2 mm, realizat din mai multe straturi de hîrtie de 0,06 mm răsfrînt parțial peste partea frontală a înfășurării, cît și *șaiba electroizolantă răsfrîntă* (poz. 8) cu grosimea de 2 mm răsfrîntă pe toată partea frontală a înfășurării și confecționată separat din carton electrotehnic.

Se observă, de asemenea, că pentru o mai rațională utilizare a izolației conductorului, înfășurarea de înaltă tensiune care este de tip stratificată, este secționată în 2 galeți (notați cu secțiunea I și a II-a) și de înălțime *H*, fiecare, cît și faptul că distanțele de izolare față de juguri sînt diferite (s_{jm} = 2,25 cm și s_{im} = 4,9 cm), ceea ce a condus și la înălțimi diferite ale celor două înfășurări ($H_{Bj} > H_{Bi}$).

Acest lucru prezintă unele dezavantaje sub aspectul solicitărilor la forțele electrodinamice axiale compensate însă de avantajul important al unei mai bune umpleri a ferestrei și deci la dimensiuni mai mici ale transformatorului.

În figura 3.51 este reprezentat ansamblu miez bobinat al transformatorului cu schela metalică, capacul cuvei și izolatoarele de j.t. și î.t., montate pe capac. Sînt evidențiate de asemenea conexiunile între înfășurări, la comutatorul de reglaj al tensiunii și la izolatoare, atît pe partea de înaltă tensiune cît și pe cea de joasă tensiune.

În figura 3.52 este reprezentat ansamblul general al transformatorului de 250 kVA, 10/0,4 kV, cu secțiune longitudinală și transversală.

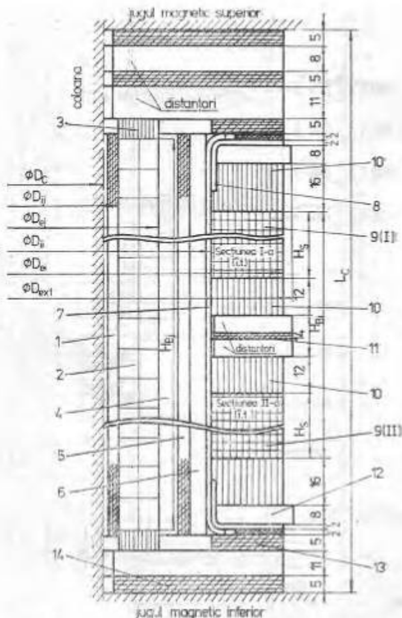


Figura 3.50. Secțiune transversală prin înfășurările unui transformator de putere mijlocie 200 kVA, 20/0,4 kV : 1 — cilindru izolant gros de 4 mm ; 2 — înfășurarea de j.t. ; 3 — izolație egalizare înfășurare de j.t. ; 4 — pene de consolidare și distanțare din pertinax ; 5 — cilindru izolant gros de 4 mm ; 6 — pene consolidate și distanțare din carton ; 7 — cilindru izolant moale din straturi de hîrtie, gros 2 mm ; 8 — șaibă răsfrîntă (carton) gros 2 mm ; 9 — înfășurare de î.t. în două secțiuni (galeți) ; 10 — egalizatori izolanți î.t. ; 11 — inel cu distanțori din carton ; 12 — distanțori ; 13 — inel izolant pentru egalizare bobină î.t. ; 14 — inel izolant cu distanțori.

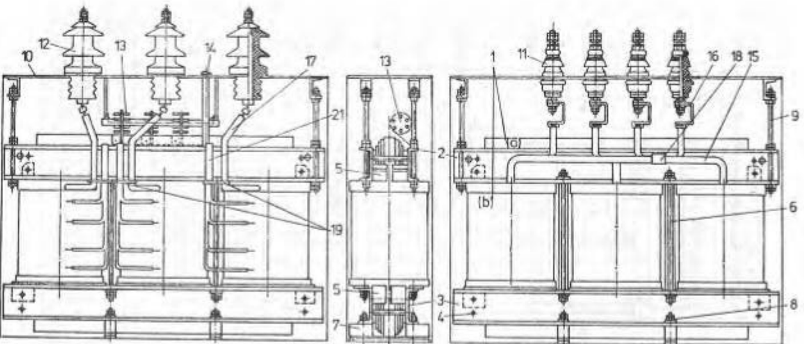


Figura 3.51. Ansamblu miez magnetic bobinat, cu capacul cuvei şi izolatoarele de trecere ale transformatorului de 250 kVA, 10/0,4 kV: 1 — ansamblu miez magnetic bobinat (a — miez; b — înfăşurări); 2 — consolă de presare jug superior; 3 — consolă de presare jug inferior; 4 — buloane de strîngere a consolelor; 5 — piese izolante pentru presare bobine; 6 — tiranţi; 7 — tălpi izolante susţinere; 8 — şuruburi cu piuliţe pentru fiecare talpă; 9 — tiranţi suspensie capac cuvă; 10 — capac cuvă; 11 — izolatoare j.t.; 12 — izolatoare î.t.; 13 — comutator de reglaj; 14 — dispozitiv acţionare comutator; 15 — conexiuni j.t.; 16 — legături flexibile j.t.; 17 — conexiuni î.t.; 18 — mufe fixare legături j.t.; 19 — plăci de conexiuni î.t.

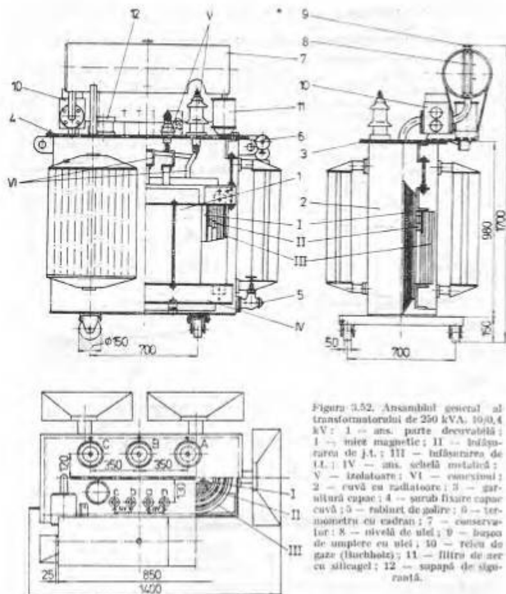


Figura 3.52. Ansamblul general al transformatorului de 250 kVA, 10/0,4 kV: 1 — ans. parte decuvabilă; I — miez magnetic; II — înfăşurarea de j.t.; III — înfăşurarea de i.t.; IV — ans. schelă metalică; V — izolatoare; VI — conexiuni; 2 — cuvă cu radiatoare; 3 — garnitură capac; 4 — şurub fixare capac cuvă; 5 — robinet de golire; 6 — termometru cu cadran; 7 — conservator; 8 — nivelă de ulei; 9 — buşon de umplere cu ulei; 10 — releu de gaze (Buchholz); 11 — filtru de aer cu silicagel; 12 — supapă de siguranţă.

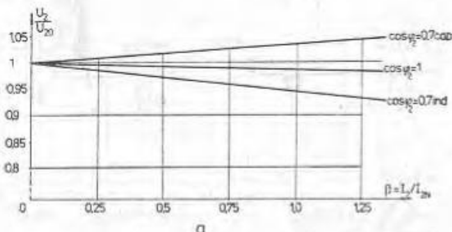
F. Caracteristicile de funcţionare

Caracteristicile externe se determină cu relaţia (3.51 a) în condiţiile menţionate de relaţia (3.51), iar *caracteristica randamentului* cu relaţia (3.52), pentru diferite valori ale lui $\beta = I_2/I_{2N}$ şi pentru U_1 = constant şi $\cos \varphi_2$ = constant. Rezultatele calculelor sînt trecute în tabelul 3.14, cu ajutorul cărora s-au trasat caracteristicile de funcţionare reprezentate în figura 3.53. În expresia randamentului s-a luat pentru P_0 valoarea dată de relaţia (3.138 a).

TABELUL 3.14

Caracteristicile de funcționare ale transformatorului de 250 kVA, 10/0,4 kV

$\beta = I_2/I_{2N}$		0	0,05	0,15	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
$\frac{U_2}{U_{20}}$	$\cos\varphi_2 = 1$	1			0,996	0,993	0,99	0,986	0,983
	$\cos\varphi_2 = 0,7$ ind	1			0,987	0,974	0,961	0,949	0,936
	$\cos\varphi_2 = 0,7$ cap	1			1,008	1,016	0,024	1,032	1,04
η	$\cos\varphi_2 = 1$	0	0,959	0,984	0,988	0,989	0,987	0,985	0,982
	$\cos\varphi_2 = 0,7$	0	0,942	0,977	0,983	0,984	0,982	0,978	0,975



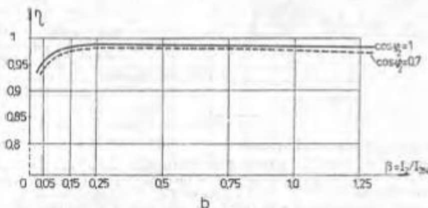


Figura 3.53. Caracteristicile de funcționare ale transformatorului de 250 kVA, 10/0,4 kV: a — caracteristicile externe; b — caracteristicile randamentului.

Din această expresie, se observă că atît pentru cos φ_2 inductiv, cît și capacitiv, caracteristica randamentului este aceeași, depinzînd doar de valoarea lui cos φ_2, nu și de caracterul sarcinii (inductiv sau capacitiv).

G. Verificarea solicitărilor mecanice

1. *Verificarea înfășurărilor la acțiunea forțelor electrodinamice.* Deoarece cele două înfășurări de j.t. și î.t. au aceleași înălțimi ($H_{Bj} \approx H_{Bi}$), iar spirele de reglaj a tensiunii sînt repartizate pe întreaga înălțime a înfășurării de î.t. (gama de reglaj de $\pm 5\%$, cuprinde un număr de $2 \cdot 78 = 156$ spire care corespund ultimului strat de 102 spire și încă 54 spire din penultimul strat), rezultă că în funcționarea transformatorului nu apar nesimetrii axiale importante ale solenațiilor, care să conducă la forțe electrodinamice axiale periculoase.

De aceea, înfășurările se vor verifica numai la acțiunea forțelor electrodinamice radiale. Se face de asemenea și o verificare la acțiunea forței interioare F_0 (fig. 3.42 *a*).

— *Curentul de șoc*, conform relației (3.53)

$$I_{km} = k_A \frac{100\sqrt{2} I_{Nt}}{u_k} = 1{,}7 \cdot \frac{100 \cdot \sqrt{2} \cdot 8{,}33}{5{,}97} = 335{,}5 \text{ A.} \qquad (3.141)$$

— *Forța radială*, conform relației (3.54)

$$F_r = \mu_0 \frac{(w_i I_{km})^2 l_{med} k_R}{2 H_B} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{(1\,558 \cdot 335{,}5)^2 \cdot 0{,}848 \cdot 0{,}922}{2 \cdot 0{,}29} \approx 463 \cdot 10^3 \text{ N.} \qquad (3.142)$$

— *Forța interioară*, care acționează în direcția axială asupra fiecărei înfășurări, conform relației (3.54 b)

$$F_0 = \frac{\delta'}{2 H_B} F_r = \frac{3{,}08}{2 \cdot 29} 463 \cdot 10^3 \approx 25 \cdot 10^3 \text{ N.} \qquad (3.142\ a)$$

— *Efortul unitar* la întindere în înfășurarea exterioară (î.t.), conform relației (3.56)

$$\sigma_r = \frac{F_r}{2 \pi w_i s_{ci}} = \frac{463 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 1\,558 \cdot 3{,}45} = 13{,}7 \text{ MPa,} \qquad (3.143)$$

valoare care este mai mică decît limitele admisibile ($\sigma_{adm} = 30$—60 MPa — pentru înfășurare din cupru).

— *Eforturile unitare* de compresiune dintre conductoarele înfășurărilor (datorită forței interioare F_0) conform relației (3.59):

— pentru *înfășurarea de joasă tensiune*

$$\sigma_{aj} = \frac{F_0}{l_{medj} a'_j} = \frac{25 \cdot 10^3}{601 \cdot 20{,}5} = 2{,}03 \text{ MPa} < \sigma_{aadm} = 20 \text{ MPa,} \qquad (3.144)$$

unde:

$a'_j = a_j - a_{ja} = 23{,}5 - 3 = 20{,}5$ mm, este grosimea netă a înfășurării de j.t.;

— pentru *înfășurarea de înaltă tensiune*

$$\sigma_{ai} = \frac{F_a}{l_{med} a_i'} = \frac{25 \cdot 10^3}{848 \cdot 34} = 0{,}867 \text{ MPa} < \sigma_{a\,adm} = 20 \text{ MPa}, \qquad (3.144\text{ a})$$

unde:

$a_i' = a_i - a_{in} = 39 - 5 = 34$ mm, este grosimea netă a înfășurării de î.t.

Pentru ca înfășurarea interioară (de joasă tensiune) să fie supusă la solicitarea de compresiune pură, se verifică mai întîi condițiile impuse de relația (3.57). Astfel numărul minim de distanțoare cu care trebuie consolidată înfășurarea de j.t. pe coloană este:

$$Z_{p\,min} = 2\sqrt{1 + \frac{1{,}75 F_r}{E w_j s_{nj}}\left(\frac{D_{jm}}{2a}\right)^2} =$$

$$= 2\sqrt{1 + \frac{1{,}75 \cdot 463 \cdot 10^3}{1{,}15 \cdot 10^5 \cdot 36 \cdot 131{,}6}\left(\frac{191{,}5}{2 \cdot 4{,}75}\right)^2} = 2{,}53 \text{ distanțoare.}$$

În realitate însă, deoarece diferența dintre diametrul coloanei D_c și diametrul interior al cilindrului izolant interior (poziția 1 fig. 3.49) este doar de 1 mm, rezultă că înfășurarea de j.t. se sprijină (prin intermediul cilindrului izolant) pe fiecare muchie a treptelor miezului magnetic al coloanei, ceea ce este echivalent cu un număr de pene de consolidare $Z_p \gg Z_{p\,min}$.

Aceasta înseamnă că înfășurarea de j.t. este supusă numai la solicitarea de comprimare pură.

— *Efortul unitar* la comprimare se determină tot cu relația (3.56) în care se introduc mărimile corespunzătoare înfășurării de j.t., adică

$$\sigma_r = \frac{F_r}{2\pi w_j s_{nj}} = \frac{463 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 36 \cdot 131{,}6} = 15{,}5 \text{ MPa}, \qquad (3.144\text{ b})$$

valoare care se încadrează în limitele admisibile ($\sigma_{r\,adm} = \sigma_{adm} = 30 - 60$ MPa, pentru înfășurare din cupru).

2. *Calculul mecanic al schelei metalice*

a. *Consolele de presare* a jugurilor, se execută din profil U10 (STAS 564-80) cu dimensiunile indicate în figura 3.54, pentru care modulele de rezistență la încovoiere se pot lua din STAS 564-80 sau se pot calcula cu relațiile [1]:

— după axa x—x

$$W_x = \frac{1}{6H}(BH^3 - bh^3) \quad [\text{mm}^3]; \qquad (3.145)$$

— după axa y—y

$$W_y = \frac{1}{3e_2}(He_1^3 - ha^3 + 2te_2^3) \quad [\text{mm}^3], \qquad (3.145\text{ a})$$

unde, poziția centrului de masă C (fig. 3.54) se determină cu relațiile:

$$e_1 = 0{,}5\frac{2B^2 + ht}{2B + h} \quad [\text{mm}];$$

$$a = e_1 - d \quad [\text{mm}]; \qquad (3.145\text{ b})$$

$$e_2 = B - e_1 \quad [\text{mm}].$$

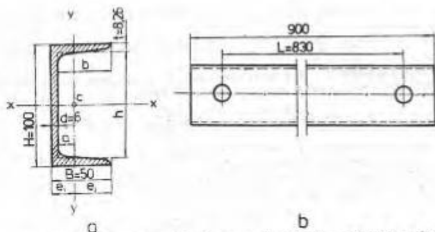


Figura 3.54. Dimensiunile consolelor de presare a jugurilor : a — profilul ; b — lungimea.

Pentru profilul *U*10 stabilit, rezultă :

$$W_x = \frac{1}{6H}(BH^3 - bh^3) = \frac{1}{6 \cdot 100}(50 \cdot 100^3 - 44 \cdot 83{,}5^3) = 4{,}06 \cdot 10^4 \text{ mm}^3, \qquad (3.146)$$

unde :

$b = B - d = 50 - 6 = 44$ mm ;

$h = H - 2t = 100 - 2 \cdot 8{,}26 \approx 83{,}5$ m ;

$$W_y = \frac{1}{3e_2}(He_1^3 - ha^3 + 2te_2^3) =$$

$$= \frac{1}{3 \cdot 34{,}5}(100 \cdot 15{,}5^3 - 83{,}5 \cdot 9{,}5^3 + 2 \cdot 8{,}26 \cdot 34{,}5^3) = 0{,}946 \cdot 10^4 \text{ mm}^3, \qquad (3.146\ \text{a})$$

unde :

$e_1 = 0{,}5\,\frac{2B^2 + ht}{2B + h} = 0{,}5\,\frac{2 \cdot 50^2 + 83{,}5 \cdot 8{,}26}{2 \cdot 50 + 83{,}5} = 15{,}5$ mm ;

$a = e_1 - d = 15{,}5 - 6 = 9{,}5$ mm ;

$e_2 = 50 - 15{,}5 = 34{,}5$ mm.

— *Momentul încovoielor*, corespunzător forței de presare a jugurilor, conform relației (3.61 a)

$$M_y = \frac{F_s L}{32} = \frac{3{,}21 \cdot 10^4 \cdot 830}{32} = 83{,}2 \cdot 10^4 \text{ Nmm}, \qquad (3.147)$$

în care :

$F_s = p_s h_j L = 0{,}25 \cdot 155 \cdot 830 = 3{,}21 \cdot 10^4$ N,

unde :

$p_s = 0{,}25$ MPa, deoarece strîngerea jugului se face cu cîte două buloane marginale, neizolate care nu trec prin tolele jugului ;

$h_j = 155$ mm ($h_j = a_1$ din relația (3.99)) ;

$L = 830$ mm (fig. 3.54 b).

— *Efortul unitar* la încovoiere datorită presării jugului, conform relației 3.63)

$$\sigma_y = \frac{M_x}{W_y} = \frac{83{,}2\cdot 10^6}{0{,}946\cdot 10^6} = 87{,}9\ \text{MPa} < 100\ \text{MPa}. \qquad (3.147\ \text{a})$$

— *Efortul unitar*, la încovoiere după axa x—x, datorită forțelor electrodinamice de presare axială, conform relației (3.63 a)

$$\sigma_{x-x} = \frac{F_0 L}{12 W_x} = \frac{25\cdot 10^3\cdot 830}{12\cdot 4{,}06\cdot 10^4} = 42{,}6\ \text{MPa} < 200\ \text{MPa}; \qquad (3.147\ \text{b})$$

b. *Buloanele de strîngere* a consolelor de presare, se execută din oțel rotund de ∅ 20 mm, filetate la capete cu M 20.

— *Efortul unitar* în bulon, datorită forței de presare și greutății părții decuvabile, conform relației (3.64 a)

$$\sigma = 0{,}187\frac{F_s}{S_b} + 2{,}5\frac{Gx}{d^3} =$$

$$= 0{,}187\frac{5{,}21\cdot 10^4}{220{,}3} + 2{,}5\frac{5\,000\cdot 3}{20^3} = 31{,}9\ \text{MPa} < 100\ \text{MPa}, \qquad (3.148)$$

unde:

$S_b = \frac{\pi\cdot 16{,}75^2}{4} = 220{,}3\ \text{mm}^2$ (pentru M20, diametrul minim la baza filetului este de 16,75 mm);

$x = 3$ mm;

$$G = (G_{schela} + G_{mirz} + G_u)g = (G_{schela} + G_{Tre} + G_{Fej} + G_{uj} + G_u)g =$$

$$= (40 + 135 + 219 + 25{,}4 + 42{,}6)\cdot 9{,}81 = 4\,532\ \text{N}.$$

Ținînd cont și de alte elemente asamblate pe partea decuvabilă, se consideră că greutatea totală este

$$G \approx 1{,}1\cdot 4\,532\ \text{N} \approx 5\,000\ \text{N}.$$

Verificarea buloanelor la forța axială de scurtcircuit (de presare a înfășurărilor F_0), conform relației (3.65 a)

$$\sigma = \frac{4{,}6 F_0 x}{d^3} = \frac{4{,}6\cdot 25\cdot 10^3\cdot 3}{20^3} = 43{,}1\ \text{MPa} < 200\ \text{MPa}. \qquad (3.148\ \text{a})$$

Verificarea la strivire a izolației bulonului nu se face, deoarece buloanele de strîngere sînt în afara miezului și nu este nevoie să fie izolate.

II. Calculul termic al transformatorului

1. *Căderea de temperatură dintre înfășurare și ulei*

a) *La înfășurarea de joasă tensiune*, de tip cilindric, temperatura medie a bobinei se poate considera egală cu cea maximă, și deci

$$\vartheta_1 = \vartheta_2 = 0.$$

Căderea de temperatură în izolația conductoarelor, în baza relației (3.69) este (vezi și fig. 3.44)

$$\vartheta_3 = q_j\frac{\delta}{\lambda_{iz}}\cdot 10^{-4} = 881\cdot\frac{0{,}018}{0{,}0014}\cdot 10^{-4} \approx 1{,}1\ ^\circ\text{C}, \qquad (3.149)$$

unde:

$\delta = 0{,}018$ cm, grosimea unilaterală a izolației de hîrtie a conductorului de j.t. (pe o parte);

$\lambda_{iz} = 0{,}0014$ W/cm °C, din tabelul 3.9, pentru hîrtie impregnată în ulei.

b) *La înfășurarea de înaltă tensiune*, de tip stratificat, $\vartheta_1 \neq \vartheta_2$ și, pentru partea bobinei exterioară canalului axial, mai groasă, căderea maximă de temperatură, conform relației (3.71) este (vezi fig. 3.44)

$$\vartheta_1 = \frac{pa_e^2}{8\lambda_m} = \frac{8\cdot10^{-2}\cdot2{,}17^2}{8\cdot5{,}06\cdot10^{-3}} = 9{,}3°C, \qquad (3.149\ a)$$

în care:

— pe baza relației (3.72 a)

$$p = k_p \frac{J^2ab}{(a'+\delta_s)b'}\cdot10^{-2} = 2{,}14\ \frac{2{,}41^2\cdot0{,}18\cdot0{,}212}{(0{,}21+0{,}036)\cdot0{,}242}\cdot10^{-2} \approx 8\cdot10^{-2}\ \text{W/cm}^2;$$

— pe baza relației (3.73 a)

$$\lambda_m \approx \lambda_i \frac{(a'+\delta_s)b}{(2\delta+\delta_s)b'} = 1{,}55\cdot10^{-3}\cdot\frac{(0{,}21+0{,}036)\cdot0{,}212}{(0{,}03+0{,}036)\cdot0{,}242} = 5{,}06\cdot10^{-3}\ \text{W/cm°C},$$

cu conductibilitatea termică echivalentă dată de relația (3.73 b)

$$\lambda_i = \frac{\lambda\lambda_s(2\delta+\delta_s)}{\lambda_s 2\delta+\lambda\delta_s} = \frac{1{,}4\cdot10^{-3}\cdot1{,}7\cdot10^{-3}(0{,}03+0{,}036)}{1{,}7\cdot10^{-3}\cdot0{,}03+1{,}4\cdot10^{-3}\cdot0{,}036} = 1{,}55\cdot10^{-3}\ \text{W/cm°C},$$

unde, din tabelul 3.9 rezultă:

$\lambda = 1{,}4\cdot10^{-3}$ W/cm°C — pentru izolația de hîrtie impregnată în ulei, a conductorului;

$\lambda_s = 1{,}7\cdot10^{-3}$ W/cm°C — pentru izolația dintre straturi, din hîrtie lăcuită (impregnată în lac),

iar $2\delta = a' - a = b' - b = 0{,}3$ mm $= 0{,}03$ cm, este grosimea bilaterală a izolației conductorului;

— grosimea părții exterioare a bobinei de î.t. care are $n_s'' = 9$ straturi este

$$a_e = n_s''a' + (n_s''-1)\delta_s = 9\cdot0{,}21 + (9-1)\cdot0{,}036 = 2{,}17\ \text{cm}.$$

Căderea medie de temperatură, conform relației (3.68) este

$$\vartheta_2 = \frac{2}{3}\vartheta_1 = \frac{2}{3}\cdot9{,}3 = 6{,}2°C. \qquad (3.149\ b)$$

c) *Căderea de temperatură între suprafața bobinei și ulei*, conform relației (3.75) este:

— pentru înfășurarea de joasă tensiune

$$\vartheta_{4j} = 0{,}285q_j^{0{,}6} = 0{,}285\cdot881^{0{,}6} = 16{,}6°C; \qquad (3.150)$$

— pentru înfășurarea de înaltă tensiune

$$\vartheta_{4i} = 0{,}285q_i^{0{,}6} = 0{,}285\cdot715^{0{,}6} = 14{,}7°C. \qquad (3.150\ a)$$

d) *Căderea medie de temperatură dintre înfășurare și ulei* (vezi fig. 3.44) pentru înfășurarea de înaltă tensiune, a cărei valoare este mai mare decît a înfășurării de joasă tensiune, rezultă cu relația (3.77)

$$\vartheta_{mîu} = \vartheta_2 + \vartheta_3 + \vartheta_{4i} = 6{,}2 + 1{,}1 + 14{,}7 = 22^\circ C. \qquad (3.151)$$

După cum se observă, această valoare este apropiată de limitele indicate în tabelul 3.8, pentru modul de răcire de tip NL considerat (vezi paragraful 3.8).

2. *Căderea maximă de temperatură medie între miez și ulei*, conform relației (3.78)

$$\vartheta_{maxfu} = \vartheta' \frac{\vartheta_4'' + 1{,}5\vartheta_1''}{\vartheta' + \vartheta_4'' + 1{,}5\vartheta_1''} = 10{,}62 \frac{8{,}75 + 1{,}5 \cdot 11}{10{,}62 + 8{,}75 + 1{,}5 \cdot 11} = 7{,}47^\circ C, \qquad (3.152)$$

în care conform relațiilor (3.78 a):

$$\vartheta_1' = \frac{pa^2}{8\lambda_1} = \frac{11{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 15{,}5^2}{8 \cdot 0{,}2} = 1{,}72^\circ C, \qquad (3.152\ a)$$

unde:

— conform relațiilor (3.79) și (3.79 a)

$$p = p_{Fe}\gamma_{Fe}k_{Fe} = k_s p_{10/50}\left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} B_{c}^2\gamma_{Fe}k_{Fe} =$$

$$= 1{,}25 \cdot 0{,}45 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1{,}676^2 \cdot 7{,}65 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}95 \approx 11{,}5 \cdot 10^{-3}\ W/cm^3;$$

— conform figurii 3.45 și figurii 3.48

$a = a_1 = 15{,}5$ cm (v. rel. (3.97 a));

$b = 2\sum b_i = 15{,}2$ cm (v. rel. (3.97 b));

— din tabelul 3.11:

$\lambda_l = 0{,}2\ W/cm^\circ C$;

$\lambda_t = 0{,}03\ W/cm^\circ C$;

$$\vartheta_4' = \frac{pa}{2\alpha_{conv}} = \frac{11{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 15{,}5}{2 \cdot 0{,}01} = 8{,}9^\circ C, \qquad (3.152\ b)$$

unde, $\alpha_{conv} \approx 100\ W/m^2\,^\circ C = 0{,}01\ W/cm^2\,^\circ C$;

$$\vartheta' = \vartheta_1' + \vartheta_4' = 1{,}72 + 8{,}9 = 10{,}62^\circ C;$$

$$\vartheta_1'' = \frac{pb^2}{8\lambda_t} = \frac{11{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 15{,}2^2}{8 \cdot 0{,}03} = 11^\circ C; \qquad (3.152\ c)$$

$$\vartheta_4'' = \vartheta_4' \frac{b}{a} = 8{,}9 \frac{15{,}2}{15{,}5} = 8{,}75^\circ C. \qquad (3.152\ d)$$

Se observă că ϑ_{maxfu} are o valoare destul de mică, deoarece și pierderile în fier au o valoare mică în comparație cu pierderile în înfășurări.

3. *Dimensiunile interioare ale cuvei și suprafețele de cedare a căldurii.*

a) Considerind cuva dreptunghiulară, *dimensiunile cuvei*, date de relațiile (3.83), sint (vezi și fig. 3.47):

$$A = 2M + D_{ei} + 2s_5 = 2 \cdot 32 + 30,9 + 2 \cdot 3 = 100,9 \text{ cm} \approx 100 \text{ cm};$$

(3.153)

$$B = D_{ei} + s_1 + s_2 + d_1 + s_3 + s_4 + d_2 = 30,9 + 2,5 + 2,5 + 0,3 +$$

$$+ 2 + 2 + 1 = 41,2 \text{ cm} \approx 41 \text{ cm};$$

$$H_{cv} = L_c + 2H_j + H_{jc} + H_{cj} = 34 + 2 \cdot 15,5 + 30 + 3 = 98 \text{ cm}$$

unde, distanțele de izolație conform tabelului 3.12 sint:

$$s_1 = s_2 = 2,5 \text{ cm};$$

$$s_3 = s_4 = 2 \text{ cm};$$

$$s_5 = 3 \text{ cm};$$

$$d_1 = 3 \text{ mm} = 0,3 \text{ cm (din motive mecanice)};$$

$$d_2 = 10 \text{ mm} = 1 \text{ cm};$$

— din tabelul 3.13, pentru $U_N = 10$ kV rezultă

$$H_{jc} = 30 \text{ cm};$$

— constructiv se ia

$$H_{cj} = 3 \text{ cm}.$$

Căderea de temperatură de la cuvă la aer, se estimează cu relația (3.81 b)

$$\vartheta_{ca} \leq 55 - \vartheta_{uca} = 55 - 22 = 33°\text{C}. \qquad (3.154)$$

b) *Aria suprafeței verticale a cuvei*, conform relației (3.82)

$$S_{cv} = 2(A + B)H_{cv} = 2(100 + 41) \cdot 98 = 2,76 \cdot 10^4 \text{ cm}^2 = 2,76 \text{ m}^2.$$

(3.155)

c) *Aria suprafețelor de radiație*, considerind-o cu 50% mai mare decît a cuvei ($k = 1,5$), rezultă conform relației (3.82)

$$S_r = kS_{cv} = 1,5 \cdot 2,76 = 4,14 \text{ m}^2. \qquad (3.155 \text{ a})$$

d) *Aria suprafeței de convecție* se aproximează cu relația (3.84)

$$S_{cc} = \frac{1,05(P_k + P_0)}{2,5\vartheta_{ca}^{1,25}} - 1,12\ S_r =$$

$$= \frac{1,05(3\,246 + 522)}{2,5 \cdot 33^{1,25}} - 1,12 \cdot 4,14 = 20 - 4,63 = 15,37 \text{ m}^2. \qquad (3.155 \text{ b})$$

e) *Aria elementelor de răcire*, atașate cuvei de arie $S_{cv} = 2,76$ m², este conform relației (3.85)

$$S_{er} = S_{cc} - S_{cv} = 15,37 - 2,76 = 12,61 \text{ m}^2. \qquad (3.155 \text{ c})$$

Dacă se aleg radiatoare cu țevi drepte ca în figura 1.25 (tabelul 1.3) lungimea lor nu poate fi decît $L = 71$ cm ($L = 90$ cm ar necesita o mărire a înălțimii H_{cv} a cuvei cu cca 5 ÷ 10 cm), căreia îi corespunde pentru un element aria totală de convecție (vezi „nota" de sub tabelul 1.3)

$$S'_{cr} = S_{cr} + S_{cc} = 1,98 + 0,4 = 2,38 \text{ m}^2, \qquad (3.156)$$

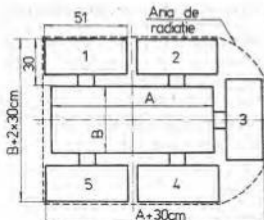


Figura 3.55. Modul de aşezare a radiatoarelor în jurul cuvei şi dimensiunile transversale pentru determinarea ariei de radiaţie. Dimensiunile sînt în cm.

pentru care rezultă

$$\frac{S_{cr}}{S'_{cr}} = \frac{12,61}{2,38} = 5,3 \text{ radiatoare.}$$

Pentru a nu mări suplimentar, din faza iniţială, dimensiunile transformatorului, se încearcă mai întîi varianta cu *5 radiatoare* dispuse cîte 2 pe părţile laterale şi unul într-o parte frontală, ca în figura 3.55; dacă încălzirile recalculate nu se încadrează în limitele admise, atunci se revine mărind numărul de radiatoare la 6 bucăţi.

Aria reală de convecţie (pentru cele 5 radiatoare), rezultă din relaţia (3.85)

$$S_{co} = S_{cr} + 5S'_{cr} = 2,76 + 5 \cdot 2,38 = 14,66 \text{ m}^2, \qquad (3.157)$$

iar aria de radiaţie, conform figurii 3.46 şi figurii 3.55 (cea cuprinsă în zona cu linie întreruptă)

$$S_r = 2[(A + 30) + (B + 60)]H_{cr} =$$
$$= 2[(100 + 30) + (41 + 60)] \cdot 98 \cdot 10^{-4} = 2,57 \text{ m}^2. \qquad (3.157 \text{ a})$$

4. *Definitivarea căderilor de temperatură din transformator*

a) *Căderea de temperatură de la cuvă la aer*, conform relaţiei (3.86)

$$\vartheta_{ca} = \left[\frac{1,05(P_k + P_0)}{2,8S_r + 2,5S_{co}}\right]^{0,8} = \left[\frac{1,05(3\,246 + 522)}{2,8 \cdot 2,57 + 2,5 \cdot 14,66}\right]^{0,8} = 36,6°\text{C}. \qquad (3.158)$$

b) *Căderea de temperatură de la ulei la cuvă*, conform relaţiei (3.87)

$$\vartheta_{uc} = 0,165k_1\left[\frac{1,05(P_k + P_0)}{S_{co}}\right]^{0,6} = 0,165 \cdot 1 \cdot \left[\frac{1,05(3\,246 + 522)}{14,66}\right]^{0,6} = 4,74°\text{C}.$$
(3.158 a)

c) *Căderea medie de temperatură de la ulei la aer*, în straturile superioare ale acestuia, conform relaţiei (3.88)

$$\vartheta_{Mua} = 1,2(\vartheta_{uc} + \vartheta_{ca}) = 1,2(4,74 + 36,6) = 49,6°\text{C} < 60°\text{C}. \qquad (3.158 \text{ b})$$

d) *Căderea de temperatură de la bobină la aer*, conform relaţiei (3.89)

$$\vartheta_{ba} = \vartheta_{mbu} + \vartheta_{uc} + \vartheta_{ca} = 22 + 4,74 + 36,6 = 63,3°\text{C}, \qquad (3.159)$$

iar temperatura bobinei t_n, pentru valoarea standardizată a temperaturii mediului ambiant $t_a = 40°$C (vezi fig. 3.44)

$$t_n = \vartheta_{ba} + t_a = 63,3 + 40 = 103,3°\text{C} < 105\ °\text{C} = t_{N\ cl.\ A},$$

deci transformatorul este bine dimensionat şi cu 5 radiatoare (105°C este temperatura admisă pentru clasa A de izolaţie a transformatorului în ulei).

În cazul în care ar fi rezultat $t_n > 10$ °C, atunci trebuia mărit numărul de radiatoare de la 5 bucăţi la 6 bucăţi.

Capitolul 4

TEHNOLOGIA DE FABRICAŢIE A TRANSFORMATOARELOR

Deoarece părţile active (circuitul magnetic şi înfăşurările) sînt cele mai importante într-un transformator, se va insista, în special, asupra tehnologiilor de fabricaţie a miezului magnetic şi înfăşurărilor. Tehnologia schelei şi a construcţiei metalice presupune operaţii simple, ca: trasarea, debitarea, ajustarea, polizarea, ştanţarea, sudarea, găurirea, îndoirea etc. Ca particularităţi tehnologice, sablarea şi lăcuirea cuvei sînt descrise la montajul general al transformatoarelor, în paragraful 4.3.1.

4.1. TEHNOLOGIA DE FABRICAŢIE A MIEZULUI FEROMAGNETIC [1, 7]

4.1.1. TEHNOLOGIA DE FABRICAŢIE A MIEZULUI FEROMAGNETIC LA TRANSFORMATOARELE DE PUTERI MICI

La transformatoarele de puteri mici, procesul tehnologic de fabricaţie a miezurilor feromagnetice, care sînt din tole profil de tablă silicioasă laminată la rece cu cristale neorientate, groasă de 0,5 mm (ca la maşinile rotative), constă din următoarele operaţii:

— debitarea tablei în benzi de lăţime corespunzătoare planului de ştanţare ales (fig. 4.1 şi 4.2), urmărindu-se în special cele care se decupează fără deşeuri (v. paragraful 1.1, fig. 1.8);



Figura 4.1. Ştanţarea tolelor *L*.



Figura 4.2. Ştanţarea tolelor *U* şi *I*.

— ştanţarea tolei, care se poate obţine cu o ştanţă simplă sau cu o ştanţă în trepte; treapta I — decuparea găurilor şi treapta a II-a — decuparea conturului;

— debavurarea, cu piatră abrazivă. Dacă ştanţarea este corespunzătoare (jocul dintre poanson şi matriţă corect şi ştanţa bine ascuţită), nu mai este necesară operaţia de debavurare;

— împachetarea şi strîngerea miezului, care se poate face direct cu asamblarea bobinei sau separat şi apoi se introduce bobina (la cele fără ţeserea tolelor şi la electromagneţi).

Strîngerea se face cu nituri (prin răsfrîngere la capete) sau cu prezoane.

4.1.2. TEHNOLOGIA DE FABRICAŢIE A MIEZULUI FEROMAGNETIC LA TRANSFORMATOARELE DE PUTERI MEDII ŞI MARI

La transformatoarele de puteri medii şi mari, miezurile magnetice sînt împachetate din tole simple de tablă silicioasă laminată la rece cu cristale orientate (texturată) cu grosimea de 0,28—0,35 mm, iar realizarea lor comportă următoarele operaţii:

— debitarea tamburilor de tablă silicioasă în benzi de lăţimea tolelor;
— tăierea la lungime sub un unghi de 45° şi în „V";
— reconacerea tolelor;
— împachetarea miezurilor magnetice.

A. **Debitarea tamburilor de tablă silicioasă în benzi şi tole.** Pentru aceasta, se montează cuţitele la distanţele necesare pe capul tăietor al maşinii speciale de debitat cu discuri, verificîndu-se jocul dintre cuţite cu ajutorul calibrelor (spionilor), după care se introduce ruloul pe derulor şi se strînge pe acesta. După fixarea tablei în dispozitivul de ghidare şi trecerea acesteia prin capul de tăiere, prin dispozitivele de antrenare, de separare, de presare şi de fixare a benzilor pe tamburul dispozitivului de bobinare (operaţii care se fac prin comandă manuală), se trece apoi maşina pe funcţionarea automată.

B. **Tăierea la lungime sub un unghi de 45° şi în „V".** Această operaţie se realizează cu ajutorul liniei automate de tăiat la lungime a tolelor, compusă dintr-o reuniune de ansambluri mecanice cu acţionare distinctă, ce funcţionează într-un program de lucru comun, a cărui sincronizare este asigurată de un panou special.



Figura 4.3. Schema principială a maşinii automate de debitat tole.

Derulorul (vezi fig. 4.3) serveşte la susţinerea ruloului de tablă silicioasă în poziţie orizontală, tensiunea de derulare a tolei de pe un tambur fiind controlată de un sistem de frînare autoreglabil.

Debavuratorul înlătură bavurile rezultate la tăierea în fişii prin procedeul aşchierii, fiind constituit din două suporturi de oţel, care susţin un număr de 32 de cuţite rotative ce se lasă automat pe tolă şi elimină, prin aşchiere, bavurile şi proeminenţele de pe muchiile tolei. Suporturile sînt prevăzute cu contragreutăţi pentru echilibrarea forţelor de aşchiere.

Ansamblul antrenor asigură alimentarea maşinii cu bandă culeasă de pe derulor, iar *ansamblul ghilotină* are rolul de a executa tăierea tolei în momentul cînd aceasta a atins lungimea fixată la opritor. În acest scop funcţional, ghilotina este de o construcţie specială şi anume ghidează cu precizie tola ce intră în zona cuţitelor, efectuînd automat comenzile ce-i sînt transmise şi anume:

— blocarea tolei;
— tăierea tolei.
— eliberarea tolei imediat după tăiere;
— confirmă printr-un impuls electric efectuarea acestor operaţii;
— înregistrează pe un numărător mecanic numărul de tole debitate.

Ştanţele au rolul de a executa decupări în tole în formă de „V", fiind acţionate pneumatic atît pentru tăiere, cît şi pentru a apăsa banda pe rulmenţii ghidajelor astfel încît decuparea să se poată realiza la precizia solicitată. *Separatorul de tole* separă tolele de jug de cele pentru coloană, în funcţie de sensul unghiului sub care se debitează tola, stivuirea făcîndu-se în final, pe mesele de preîmpachetare, construite la înălţimea maximă de 400 mm.

Operaţiile de reglare a ştanţelor, foarfecelor şi limitatoarelor se fac, în funcţie de dimensiunile tolelor, conform tabelelor de calcul din instrucţiunile maşinii.

C. **Recoacerea tolelor.** În timpul tăierii tolelor, pe o distanţă de circa 10 mm de la muchia tăiată sau ştanţată, orientarea cristalelor în tole este modificată şi reluctanţa magnetică creşte. Efectul se resimte mai mult la miezurile mici şi la cele în dublă ramă şi mai puţin la cele mari, cu tole de lăţime relativ mare. Recoacerea tolelor se face cu scopul de a reface structura cristalografică şi deci proprietăţile lor ce au fost modificate din cauza tăierii. Tabla silicioasă trebuie să fie izolată cu o izolaţie specială, pe ambele feţe, şi să permită recoacerea la 800°C ± 10°C. Recoacerea se face, tolă cu tolă, într-un cuptor tunel, fără atmosferă neutră (cu aer), cu viteza optimă de

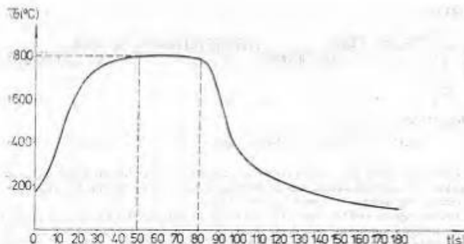


Figura 4.4. Diagrama de recoacere a tolelor miezului magnetic.

6,64 m/min, timpul fiind cel din diagrama de recoacere: zona de încălzire 50 secunde, zona de menținere 30 de secunde și zona de răcire de 100 de secunde (fig. 4.4).

D. **Împachetarea miezurilor magnetice.** Miezurile transformatoarelor mici se împachetează pe mese obișnuite, de lemn sau de oțel, iar cele ale transformatoarelor mai mari, se asamblează în secția de montaj cu ajutorul unor construcții speciale de oțel. Pe construcție, în decupări speciale, se așază elementele schelei de pe aceeași parte a transformatorului, la o înălțime care să permită prinderea tălpilor, la cotele din desen, în așa fel încît să se evite existența întrefierurilor de îmbinare, iar coloanele și jugurile să fie la același nivel.

Se începe împachetarea respectînd alternanța ciclurilor de împachetare. Din experimentările efectuate, a rezultat ca avantajoasă împachetarea cu două tole pe strat. În cazul împachetării cu o singură tolă pe strat, cheltuielile suplimentare de manoperă depășesc economiile la pierderile în fier, iar în cazul împachetării cu mai mult de două tole pe strat economiile obținute la manoperă nu justifică creșterea pierderilor în fier.

După asamblarea tuturor tolelor miezului și după așezarea corectă a lor la transformatoarele de pînă la 10 MVA, acestea se vor lăcui pe muchii cu lac de consolidare RL 810, care prin capilaritate pătrunde cîțiva milimetri între tole. Se așază, apoi, izolația jugului și elementele schelei de pe cealaltă parte a transformatorului, iar miezul se strînge provizoriu cu buloane. Pentru demontarea și montarea tolelor jugului superior, se lasă o distanță convenabilă, nelipită, la marginea de sus a coloanelor. Pe coloanele miezului se așază platbenzile dispozitivului de strîngere și se strînge dispozitivul, lăsîndu-se miezul pe masa de împachetat 24 de ore, pentru polimerizarea lacului RL 810.

După montarea tălpilor cu anexele respective și după polimerizarea lacului, se demontează dispozitivul de strîngere provizorie, apoi se montează și se strîng tiranții.

4.2. TEHNOLOGIA DE FABRICAȚIE A ÎNFĂȘURĂRILOR [1,7]

Urmărind descrierea constructivă a tipurilor de înfășurări din paragraful 1.2, se va considera de bază procesul tehnologic de la înfășurarea cilindrică, la celelalte tipuri de înfășurări menționîndu-se doar particularitățile tehnologice.

A. **Procesul tehnologic de fabricație al înfășurării cilindrice** cuprinde următoarele operații principale:

— se izolează conductoarele, prin înfășurarea cu bandă de hîrtie în mai multe straturi 1/2 suprapus, cu mașina automată specială. Numărul de straturi izolante prevăzut în documentație conform STAS 6163-76 (v. anexa 3 — tab. 3-II și 3-III), este înfășurat în sensuri diferite: un strat pe dreapta, unul pe stînga ș.a.m.d.;

— se montează pe mașina de depănat cilindrul izolant din straticel, împreună cu șablonul respectiv;

— pe cilindru se lipește o foaie de hîrtie de cablu, pe care, la rîndul ei, se lipesc, cu poliacetat de vinil, echidistant, penele pentru canalul de răcire;

— se consolidează coturile cu bandă de bumbac, prinzîndu-se, în același timp, atît paravanul de trafoboard dintre ieșirile bobinei, cît și sectorul (pana) de egalizare a bobinei (v. fig. 3.14);

— se deapănă primul strat, de ultima spiră prinzîndu-se egalizatorul de la celălalt capăt al bobinei;

— la înfășurarea cilindrică cu două straturi și canal axial de răcire între ele se așază penele canalului axial de răcire, se fixează egalizatorii pentru stratul exterior și se deapănă stratul următor similar cu primul strat;

— atunci cînd înfășurarea se face cu mai mult de patru conductoare în paralel (în cazul în care curentul este mai mare de 500 A) pentru ca înălțimea spirei să nu fie prea mare, se procedează și la suprapunerea radială a cîte două fire. De aceea, cînd se trece la depănarea celui de al doilea strat, se efectuează și *transpunerea conductoarelor* (firele din stratul interior sînt trecute în stratul exterior și invers, cum se indică în figura 1.12).

> *Observație:* Deosebit de important este ca penele distanțoare de realizare a canalelor axiale de răcire (interior — între înfășurare și miez, între straturile aceleiași înfășurări și între înfășurări — de joasă tensiune și înaltă tensiune) să fie, pe cît posibil, în număr egal pentru toate canalele și dispuse unele în dreptul altora, așa cum se indică în figura 4.7. Acest lucru este impus de o bună comportare a înfășurărilor la acțiunea forțelor electrodinamice radiale, în caz de scurtcircuit.

La transformatoarele uscate, tehnologia bobinelor este asemănătoare, cu deosebirea că se folosesc materiale în clasă de izolație *F*.

B. **Procesul tehnologic al înfășurării în folie de aluminiu** cuprinde următoarele operații principale:

— se montează ruloul de bandă de *Al* pe derulorul mașinii cu ajutorul cărucioruiui de ridicare cu furcă;

— se trage banda de *Al* și se fixează barele de intrare ale conexiunii în dispozitivul de strîngere, în vederea efectuării automate a cordonului de sudură în mediul protector de argon;

— se sudează frontal banda cu barele de intrare (v. fig. 3.30 *a*);

— după efectuarea sudurii se fixează dornul mașinii hîrtia necesară izolației între straturi, iar la primul strat de bandă, peste barele de conexiune, se pune paravanul de trafoboard;

— se fixează capetele egalizatorilor între barele de conexiune, după care se începe rotirea dornului;

— cînd se ajunge la numărul de spire prevăzut în desen se introduce „ansamblul pene" pentru realizarea canalului de răcire, continuîndu-se depănarea pînă la spira finală;

— se cuplează dispozitivul hidraulic, care acționează foarfeca și se taie banda de aluminiu, care apoi se sudează frontal între cele două bare de ieșire;

— cu ajutorul cărucioruiui de susținere a bobinei se scoate bobina de pe dorn (al cărui diametru se poate regla).

Rezultă, așadar, o productivitate crescută, ca urmare a faptului că banda se depănă împreună cu izolațiile, procesul limitîndu-se, în principal, la simpla mișcare de rotație.

Toate operațiile se fac cu ajutorul mașinii speciale de depănat folie de aluminiu, alcătuită din:

— subansamblul mecanic;

— instalația hidraulică;

— echipamentul electric.

Subansamblul mecanic conține:

— caseta pentru derulare, care folosește la fixarea ruloului cu materialul necesar și pentru tragerea liberă a benzii în timpul procesului de depănare;

— ghidajul benzii, alcătuit din valțurile de antrenare (care preiau transportul benzii), dispozitivul de curățire a benzii, masa de ghidare (ghidează forțat banda în rolele de ghidare), frîna benzii (pentru realizarea pretensionării benzii) și foarfecele (pentru tăierea benzii, după terminarea depănării);

— ansamblul de fixare și ghidare a benzilor (de marginea acestora);

— dispozitivul de sudare;

— dornul pentru depănare.

Instalația hidraulică îndeplinește următoarele funcțiuni:

— execută comenzile de poziționare pentru dispozitivul electrohidraulic de reglare a tamburilor;

— acționează cilindrii de lucru pentru valțurile de acționare, frîna benzii și foarfecele.

Echipamentul electric este alcătuit din panoul de comandă cu aparate electrice pentru cuplarea și distribuirea energiei electrice, pentru comanda motoarelor de acționare, pentru măsurarea curenților de sudură etc.

C. În cazul **înfășurării stratificate** procesul tehnologic este asemănător cu cel al înfășurării cilindrice, particularitatea constituind-o, așa cum s-a menționat în paragraful 1.2.2, folosirea, între straturi, a unei izolații de hîrtie, a cărei grosime este proporțională cu tensiunea dintre straturi (v. tabelul 3.6).

De remarcat că acest tip de înfășurare este singurul utilizat la transformatoarele de puteri mici și foarte mici, la care depănarea se face direct pe carcasă (vezi fig. 3.4) și că necesită o manoperă redusă în raport cu toate celelalte tipuri de înfășurări.

D. La **bobinele în galeți** particularitățile tehnologice le constituie intercalarea distanțorilor între spire (v. paragraful 3.3.3 D și fig. 3.26), respectiv galetul plan dublu sau galetul jumelat (fig. 3.24).

Pentru depănarea galetului jumelat, se procedează astfel (fig. 4.5):

— se taie de pe tamburul cu conductor o lungime necesară executării întregului galet dublu;

— se înfășoară pe rola de înmagazinare 1, alăturată șablonului, jumătate din lungimea tăiată;

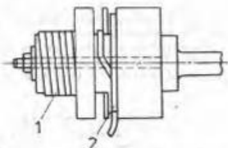


Figura 4.5. Modul de depănare a galeților jumelați.

— se face o îngenunchere conductorului, necesară trecerii de la un galet la altul, de la care se începe depănarea definitivă pe partea a doua a șablonului 2 a celeilalte jumătăți a lungimii conductorului, rezultînd jumătatea a doua a galetului dublu;

— se scoate rola de înmagazinare 1 de pe axul mașinii de depănat, iar șablonul se întoarce cu 180°;

— se fixează partea conductorului de pe rolă în dispozitivul de întindere și se deapănă definitiv, de pe rola de înmagazinare pe prima parte a șablonului și cealaltă jumătate a galetului dublu.

În felul acesta, înserierea celor doi galeți componenți rămîne la interior, iar cele două capete ale galetului jumelat, la exterior.

E. În cazul **bobinelor de tip continuu**, în galeți, particularitatea tehnologică o constituie răsturnarea galeților, care este descrisă în paragraful 3.3.3.C (vezi fig. 3.19).

F. La **înfășurarea spiralată** procesul tehnologic de fabricație este asemănător celui al bobinelor cilindrice, intervenind, în plus, în timpul depănării, operația de realizare a *transpoziției* (v. paragraful 3.3.3.B și fig. 3.16) și intercalarea distanțorilor între spire, pentru obținerea canalului de răcire, fapt ce impune o manoperă mai ridicată decît la înfășurarea cilindrică cu conductoare în paralel.

Bobinele de înaltă tensiune și de joasă tensiune pot fi depănate fiecare, separat, sau în special la înfășurările stratificate, una peste cealaltă, caz în care întîlnim *înfășurarea monolit* sau *monobloc* (v. fig. 3.49), la care realizarea izolațiilor și a canalelor de răcire dintre bobinele de I.T. și cele de J.T. (folosind preșpan și pene din trafoboard) se face astfel:

— se montează bobina de joasă tensiune pe mașina pe care se va depăna bobina de înaltă tensiune;

— se rulează un strat de hîrtie de grosime 0,06 mm;

— se lipesc, echidistant, penele pentru canalul de răcire cu poliacetat de vinil și se consolidează cu bandă de bumbac;

— se rulează preșpanul, în timp ce se strînge cu bandă de bumbac, în numărul de straturi corespunzător realizării grosimii indicate în desenul de bobină;

— se înfășoară două straturi de hîrtie de grosime 0,06 mm lipite, după care se începe depănarea bobinei de înaltă tensiune, prevăzîndu-se, la capete, izolația corespunzătoare.

Începînd de la puterea de cca 10 MVA, înfășurările se fac numai separat, deoarece în acest caz se ușurează atît montarea, cît și demontarea acestora (în caz de reparații), reducîndu-se și dificultățile de transport interior.

4.3. ASAMBLAREA ȘI ÎNCERCAREA CALITATIVĂ [1, 7, 11] A TRANSFORMATOARELOR

Montajul sau asamblarea transformatoarelor se face într-o hală de fabricație înaltă, înzestrată cu un număr corespunzător de poduri rulante, circulînd la diferite înălțimi. Hala respectivă trebuie să fie, de asemenea, înzestrată, în afară de acestea, și cu diferite instalații speciale și anume: suporturi de montaj, mese pentru asamblarea și ridicarea miezurilor mari, aparate de sudură pentru lipirea barelor și a conductoarelor, stand de probe, cuptoare pentru uscare, prese de montaj etc. Pentru realizarea unei producții maxime este necesar ca transformatorul să se găsească un timp cît mai scurt în secția de montaj.

În acest scop, toate piesele pentru montaj trebuie finisate, în măsura posibilităților, în secțiile respective de fabricație. O excepție de la această regulă o constituie asamblarea miezurilor transformatoarelor mari, la care, din cauza necesității folosirii unor poduri rulante grele, asamblarea se face chiar în hala de montaj.

Secția de montaj trebuie să primească bobinele finisate și capacele cuvelor complet montate, cu izolatoarele și cu comutatoarele de prize. În acest caz, în secția de montaj nu rămîn de efectuat decît un număr redus de operații, care pot fi terminate într-un timp mai scurt.

4.3.1. ASAMBLAREA TRANSFORMATOARLOR DE PUTERE

Ținînd seama de construcția și de principalele părți componente ale transformatoarelor, indiferent de mărimea lor, procesul tehnologic de asamblare cuprinde operațiile necesare legate de:

— asamblarea bobinelor pe miezul feromagnetic (bobinarea);
— asamblarea generală a transformatoarelor.

A. **Asamblarea bobinelor pe miezul feromagnetic (bobinarea).** Conform figurii 4.6, după demontarea schelei superioare 4 și despachetarea jugului superior 2 (despachetarea se face scoțîndu-se pachetele formate din două-trei tole, din părțile laterale către mijloc, simultan din două părți, și așezîndu-se în ordinea inversă împachetării) se introduc, mai întîi, pe coloane, izolațiile din partea inferioară a înfășurărilor (inelele de presare din lemn stratificat densificat și inelele cu distanțori 5, executate din trafoboard — pentru transformatoarele în ulei, și din sticlostratitex — pentru transformatoarele uscate). Se introduc apoi pe coloane bobinele de joasă tensiune 6 și de înaltă tensiune 7 (manual sau cu ajutorul macaralei, în funcție de puterea transformatorului, de care depind dimensiunile bobinelor).

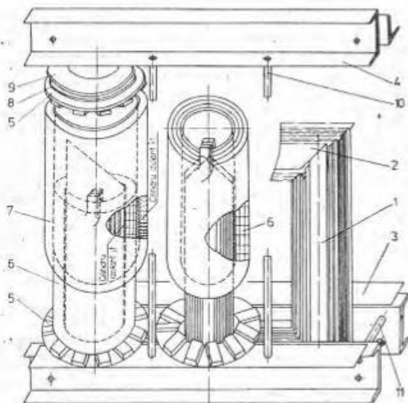


Figura 4.6. Montarea bobinelor unui transformator pe miezul magnetic.

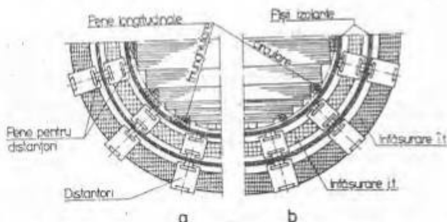


Figura 4.7. Dispunerea penelor longitudinale și distanțoare (una în dreptul alteia — pe aceeași generatoare), la asamblarea bobinelor transformatoarelor : a — pene longitudinale triunghiulare ; b — pene longitudinale circulare.

Bobinele interioare de joasă tensiune, sînt distanțate față de miezul 1 prin intercalarea unor *pene longitudinale* de secțiune circulară sau triunghiulară.

Foarte importantă este observația ca bobinele de joasă și de înaltă tensiune să nu fie răsucite una față de alta, iar penele (uscate în prealabil, în cuptor, la 100°C, timp de 8—10 ore) pe care sînt montate bobinele sau rîndurile de galeți (care constituie canalele axiale), să fie, de asemenea, dispuse exact față în față și în număr egal pentru diferitele canale axiale" (fig. 4.7). Aceste pene se vor dispune, pe cît posibil, și în dreptul penelor longitudinale care distanțează cilindrul interior de miez. Dacă penele nu sînt așezate unele în dreptul celorlalte, forțele radiale de scurtcircuit pot provoca deformarea sau distrugerea bobinelor.

După introducerea bobinelor pe coloane, se introduc izolațiile 5 din partea superioară a bobinelor, apoi se procedează la executarea împămîntării inelelor de presare 8 și de protecție 9, dacă sînt prevăzute (ele sînt întrerupte, pentru a nu forma spire în scurtcircuit).

Ultima operație din cadrul bobinării o constituie asamblarea prin țesere a jugului magnetic superior, după care se montează schela superioară 4, buloanele de strîngere 11 și tiranții 10, cu ajutorul cărora se presează bobinele transformatoarelor în ulei. Presarea axială a bobinelor este necesară deoarece bobinele, după depănare și asamblare pe miez, au, în general, o dimensiune axială (înălțime) cu 2—4% mai mare decît cea prevăzută în proiect, din cauza tensiunilor mecanice interne ale conductoarelor, astfel încît ele trebuiesc uscate și strînse de cel puțin două ori.

Practica a arătat că, pentru a evita efectele dăunătoare ale forțelor electrodinamice axiale în cazul scurtcircuitului brusc, strîngerea bobinelor înainte de uscare nu este suficientă. Cum bobinele, după cîteva zeci de ore de depozitare, își măresc din nou, considerabil, dimensiunea axială, asigurarea lor contra destinderii se face, cel mai frecvent, prin inele de presare metalice sau din lemn stratificat densificat, consolidate de console între care se prevăd tiranții.

După legarea la pămînt a miezului, se asamblează paravanele dintre bobinele de înaltă tensiune.

B. **Asamblarea generală a transformatoarelor.** Pentru transformatoarele obișnuite, răcite cu ulei, montajul general constă din introducerea ansamblului miez cu capac și elementele asamblate pe el (izolatori, comutatoare etc.) — numit *parte decuvabilă* în interiorul cuvei cu ulei, după care urmează montarea celorlalte accesorii și încercarea la standul de probe.

1. *Pregătirea părții decuvabile* (fig. 3.51). În funcție de construcția transformatorului (cu capac îmbinat cu schelele și cu miezul ca în figura 3.51 sau cu capac independent, montat pe cadrul superior al cuvei), se procedează, mai întîi, la asamblarea capacului, apoi la executarea conexiunilor atît între înfășurări, cît și la comutatorul de reglaj și la izolatoarele de trecere.

Conexiunile se proiectează astfel încît să fie cît mai scurte trebuind a fi rigidizate și fixate pe suporturi din material izolant, prinse de schelă (v. fig. 3.51). Conexiunile la izolatoarele de trecere se preferă elastice, pentru a evita posibilitatea ruperii lor în timpul transportului, cînd transformatorul este supus la șocuri. După executarea conexiunilor, transformatorul se curăță cu un jet de aer comprimat, apoi este supus la toate verificările și măsurătorile posibile în această stare (verificarea rezistenței electrice, a raportului de transformare

și a grupei de conexiuni, măsurarea rezistenței de izolație etc.), după care transformatoarele în ulei sînt supuse uscării, iar transformatoarele uscate se impregnează în lac de impregnare corespunzător clasei de izolație *F*.

La transformatoarele în ulei, materialele principale din care este formată izolația acestora sînt hîrtia și uleiul. Ambele materiale sînt higroscopice dar, în mod special, hîrtia, datorită structurii sale foarte poroase. După [1], la temperatura mediului ambiant, la presiune atmosferică normală și la o umiditate relativă a aerului de 50—75%, hîrtia conține între 6 și 12% apă. Capacitatea de absorbție de apă în ulei este mult mai mică, însă un conținut chiar foarte redus de apă reduce foarte mult rigiditatea dielectrică a uleiului. Conform acelorași autori, pentru ca uleiul să păstreze caracteristicile sale dielectrice bune, conținutul de apă nu trebuie să depășească cca. 10 g la tona de ulei.

Izolația de hîrtie a transformatorului îmbătrînește (adică își pierde în timp proprietățile electroizolante), iar conținutul de apă are o influență foarte mare asupra vitezei procesului de îmbătrînire. Cum higroscopicitatea mult mai ridicată a hîrtiei față de cea a uleiului face ca hîrtia să absoarbă umiditatea din ulei, pentru a menține umiditatea izolației de hîrtie în limite admisibile din punct de vedere al îmbătrînirii ei (adică sub 0,3%), este necesar ca umiditatea uleiului să fie menținută la cel mult cîteva grame/tonă, ceea ce asigură, totodată, și caracteristici dielectrice bune ale uleiului. Cantitatea totală de apă care trebuie eliminată prin uscare poate ajunge, în izolația unui transformator de mare putere, la cîteva sute de kilograme.

Parametrii procesului de uscare (temperatură, presiune, timp) trebuie aleși astfel încît, la sfîrșitul uscării, conținutul de apă să se reducă sub 0,1%. Uscarea sub vid a transformatorului decuvat se face în autoclave, prin încălzirea transformatorului cu aer cald pînă la 110°C și la presiune apropiată de cea atmosferică (etapă preliminară, în care conținutul de apă în izolație se reduce de la cca. 10% la cca. 1%) și apoi prin vidarea incintei pînă la 0,5 torri (1 torr = 1 mm col. Hg = 133,32 Pa) și menținerea unei temperaturi în jur de 85°C (etapă în care conținutul de apă scade de la 1% la 0,1%). Reducerea, în această perioadă, a temperaturii sub 60°C nu este indicată, deoarece în acest caz apare pericolul ca temperatura apei în straturile mai adînci ale izolației să scadă, datorită influenței evaporării la presiune scăzută, sub temperatura de congelare, ceea ce ar îngreuna eliminarea ei și ar periclita izolația prin deteriorări mecanice.

Amorsarea și menținerea temperaturii în interiorul autoclavei se poate realiza prin recirculare forțată de aer cald la 105°C, iar răcirea prin recirculare de aer la temperatura mediului ambiant.

O metodă modernă și rapidă de uscare folosește ca agent de încălzire vaporii de Kerosin, la o temperatură de 130°C. Prin condensarea vaporilor de Kerosin pe transformator, aceștia cedează căldura izolației, astfel încît se obține o creștere lentă a temperaturii obiectului uscat cu un gradient maxim de 8—10°C/oră. Odată cu încălzirea izolației, apa conținută se transformă în vapori, care vor fi antrenați de vaporii de Kerosin, asigurîndu-se, astfel, extragerea apei din cele mai profunde pături ale izolației.

Montajul general propriu-zis al transformatorului începe după uscarea părții decuvabile, iar intervalul dintre uscare și încuvare nu trebuie să depășească 8 ore, pentru a nu se expune izolația transformatorului, în mod inutil, la o nouă absorbție de umiditate.

Bobinele, cu toată uscarea și stringerea lor preliminară, se contractă după uscarea definitivă, care se face împreună cu miezul transformatorului, *stringerea definitivă*, la care bobinele cedează cca. 1—1,5% din înălțimea lor.

La transformatoarele mici și medii (pînă la cca. 10 MVA), pentru tensiuni de pînă la 35 kV, după ce se consolidează bobinele prin stringerea tiranților și se fac legăturile la izolatoarele de trecere, se fixează comutatorul liniar, pe cei doi suporți sudați de capac, în cazul comutatorului rotativ montîndu-se cupla dintre dispozitivul de acționare al comutatorului și angrenajul acestuia.

2. *Pregătirea cuvei*. În vederea montajului general, cuva transformatoarelor, de obicei în construcție sudată, este supusă, după confecționare, următoarelor operații pregătitoare:

— Se curăță cu mare atenție toată cuva, atît la interior, cît și la exterior, de toate resturile rămase de la sudură zgură, stropi de sudură etc. Curățirea se face prin sablare cu jet puternic de alice sau nisip.

— Se suflă, după sablare, cu aer comprimat peste tot, dar mai ales în interiorul cuvei, pentru înlăturarea oricăror particule de zgură sau praf.

— Lăcuirea cuvei pe suprafața interioară; această operație se face numai la transformatoarele de tensiune mare (de la 110 kV în sus). Evident, pelicula de lac trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

— să fie rezistentă la acțiunea uleiului;
— să fie uniformă și să adere bine pe pereții cuvei;
— să nu fie casantă (să prezinte proprietăți elastice corespunzătoare);
— să aibă rigiditate dielectrică bună.

— Se confecționează garniturile necesare și se montează: bușonul fund cuvă, robinetul de golire și robinetul de probe ulei.

— Se montează subansamblul cărucior (dacă e prevăzut din construcție).

— Se umple cuva, pînă la jumătate, cu ulei de transformator.

3. *Tehnologia de asamblare generală a transformatoarelor*.

Se introduce partea decuvabilă în cuvă, se montează accesoriile și se umple, fără vid, cuva cu ulei de transformator. Se string apoi șuruburile capacului în mod simetric pe cadrul superior al cuvei, după care transformatoarele cu tensiuni peste 10 kV se introduc în autoclavă, pentru cicluri de degazare.

Procesul de degazare, la transformatoarele cu puteri pînă la 1 600 kVA, cuprinde următoarele faze, repartizate în timpul necesar indicat:

— introducerea încărcăturii în autoclavă . . . . 1 oră;
— realizarea vacuum-ului la 0,5 torri . . . . 2 ore;
— vidare la 0,5 torri (1 torr = 1 mm col. Hg = 133,3 Pa) . . . . 6 ore;
— anularea vacuum-ului . . . . 0,5 ore;
— scoaterea din autoclavă . . . . 2 ore.

După degazare se completează conservatorul cu ulei pînă la nivelul gradației corespunzătoare mediului ambiant și se montează bușonul de umplere. Se introduc țipele de plumb pe sîrmele de sigiliu de la capac, de la comutator, de la robinetul de golire, eventual de la bușonul de umplere a conservatorului și de la bușonul de luat probe și se trimit transformatoarele la stand pentru probe finale.

O mențiune specială se impune a fi făcută la transformatoarele cu tensiuni foarte înalte, la care uscarea se face în cuptoare, direct în cuvă, după un pro-

gram special, iar umplerea cu ulei se face sub vid (vidul se face chiar în cuvă). La acestea, strîngerea definitivă a bobinelor trebuie făcută în perioada finală de uscare, însă înaintea introducerii uleiului în transformator. În acest caz, se întrerupe uscarea în faza finală, se scoate transformatorul din cuptor, se string bobinele și toate buloanele și șuruburile, care apoi se asigură.

După aceste operațiuni, transformatorul este introdus din nou în cuptor pentru a se termina procesul de uscare. Cînd uscarea este terminată, în transformator se introduce ulei sub vid și atunci nu mai există nici un pericol ca înfășurările să absoarbă din nou umezeală.

Se exemplifică cele menționate, prin programul de uscare, montaj și umplere cu ulei al unui transformator bloc de 400 MVA, 400/24 kV.

Primul ciclu de uscare durează 216 ore și anume:

— ventilație la 100—105°C timp de 72 de ore;

— vacuum la temperatura de 85—95°C și presiunea de 1—5 torri, timp de 12 ore;

— ventilație la 100—105°C timp de 48 de ore;

— vacuum la temperatura de 85—95°C la presiunea de 1—5 torri — 24 ore;

— ventilație la 100—105°C la presiunea de 1—5 torri — 24 de ore;

— vacuum la 85—95°C și presiunea de 1—5 torri (1 torr = 133,3 *Pa*) — 36 ore; timpul maxim de întrerupere pentru operațiile de presare și consolidare este de 18 ore, iar ciclul al II-lea de uscare cuprinde:

— ventilație la 100—105°C timp de 48 de ore;

— vacuum la temperatura de 85—95°C la presiunea de 0,1—0,5 torri, timp de 24 de ore;

— ventilație la 100—105°C la 0,1—0,5 torri — 24 de ore;

— vacuum la 85—95°C și presiune 0,1—0,5 torri — 24 ore.

Programul de montaj și umplere cu ulei cuprinde:

— timp acordat pentru încuvare, după uscarea a II-a, de 20 de ore (dacă a fost necesară decuvarea pentru presarea definitivă a bobinelor);

Atenție! În ultimul timp, atît pentru o uscare și presare corespunzătoare a înfășurărilor, cît și pentru eliminarea operației de decuvare după uscarea a II-a, în vederea presării definitive a bobinelor și apoi a încuvării (timp în care înfășurarea mai vine în contact cu umiditatea din mediul ambiant), operațiile de uscare și presare se intercalează printre operațiile de fabricație ale înfășurărilor. Se realizează, astfel, o serie de uscări și presări intermediare ale înfășurărilor chiar în timpul fabricației lor. Se procedează, apoi, la o nouă uscare și presare a bobinelor în dispozitive (ca cele intermediare), înainte de asamblarea pe coloane (adică de bobinare) și, în fine, ansamblului miez bobinat (parte decuvabilă) i se face iarăși o uscare și *presarea definitivă a bobinelor*, înainte de asamblarea în cuvă, în vederea uscării finale și a umplerii cu ulei sub vid. Uscarea finală și umplerea cu ulei, sub vid, se fac după programul special menționat, fără să mai fie necesară scoaterea părții decuvabile din cuvă pentru presarea definitivă a înfășurărilor.

— timp de 36 de ore pentru umplerea cu ulei și vidarea la o presiune de 30—100 torri;

— umplerea cu ulei, sub vid, în 18 ore;

— timpul necesar pentru impregnarea bobinelor și izolațiilor în ulei și liniștirea uleiului în vederea probelor de tensiune, începînd de la prima umplere cu ulei, de 300—336 de ore.

După trecerea probelor finale se execută sigilarea propriu-zisă a transformatorului, după care se pregătește pentru expediere: se vopsește, se finisează și se ambalează.

4.3.2 ÎNCERCAREA CALITATIVĂ A TRANSFORMATOARELOR

Întocmai ca la toate tipurile de mașini electrice, și la transformatoarele electrice se deosebesc:

— probe intermediare, pe parcursul fabricației;

— probe finale — de serie și de tip — asupra produsului finit (a se vedea și paragraful 2.8).

A. **Încercările și verificările intermediare** au drept scop verificarea, în fazele de execuție, a calității materialelor și operațiilor efectuate [7]. În cazul transformatoarelor electrice de putere se efectuează următoarele probe intermediare:

— măsurarea pierderilor în fier, care se face pe miezul feromagnetic împachetat, urmărindu-se atît verificarea calității tablei silicioase folosite, cît și respectarea indicațiilor tehnologice de fabricație a miezului respectiv, verificarea făcîndu-se, de obicei, la prototipuri și la miezurile transformatoarelor mari;

— verificarea, cu inductorul, a izolației buloanelor de stringere a miezurilor (cînd acestea trec prin miez);

— verificarea rezistenței de izolație a înfășurărilor după montarea pe miezul feromagnetic (cu inductorul);

— verificarea execuției corecte a conexiunilor prin:

— verificarea egalității mărimilor (U, I, R) pe cele trei faze (simetria conexiunilor);

— raportul de transformare pe treptele de reglaj;

— grupa de conexiuni a transformatorului;

— verificarea rezistenței de izolație după presarea și uscarea bobinelor, urmărindu-se atît controlul uscării (eliminarea umidității), cît și faptul că în timpul presării izolația nu s-a deteriorat.

Pentru că este o verificare importantă, mai ales pentru miezurile feromagnetice mari, se va expune, în continuare, modul de determinare prin măsurare prealabilă a pierderilor în fier.

Încercarea se execută cu miezul complet montat și înainte de asamblarea înfășurărilor. Pentru a crea inducția magnetică nominală în miez, se bobinează pe coloanele sale o înfășurare de probă cu număr de spire redus, realizată din cablu, de obicei flexibil și bine izolat, de secțiune corespunzătoare, astfel încît, alimentat la tensiune relativ joasă, să asigure solenația necesară la funcționarea în gol. La executarea înfășurării de probă se va acorda atenție distribuirii relativ uniforme a spirelor pe înălțimea coloanei care, în prealabil, este învelită cu un preșpan subțire pentru a asigura izolația față de miez și a evita deteriorarea izolației cablurilor de către muchiile ascuțite ale miezului. Numărul de spire pe fază și conexiunea lor (stea sau triunghi) se face în mod corelat cu valorile mărimilor sursei de alimentare, folosindu-se relația:

$$w_p = w_n \frac{U_a}{U_n}, \tag{4.1}$$

în care: w_p, w_n sînt numerele de spire, pe fază, ale înfășurării de probă și ale înfășurării normale;

U_p, U_n — tensiunile de alimentare, pe fază, ale înfășurării de probă și, respectiv, ale înfășurării normale cu w_n spire.

Tensiunea de alimentare U_{pn} se alege astfel încît să rezulte un număr întreg de spire, pentru w_n și U_n indicate, de obicei, de către constructor, în specificația tehnică a produsului. Secțiunea conductorului înfășurării de probă se alege astfel încît densitatea de curent să fie de 3—3,5 A/mm², ținînd seama de faptul că valoarea curentului de probă (I_p) față de curentul propriu-zis de funcționare în gol (I_0) crește conform relației

$$I_p = I_0 \frac{w_n}{w_p} [A]. \tag{4.2}$$

Puterea activă măsurată reprezintă tocmai pierderile în miezul transformatorului.

B. **Probele de serie.** Aceste probe sînt obligatorii pentru toate transformatoarele și au drept scop verificarea încadrării produsului în datele și caracteristicile tehnice pentru care a fost construit.

Probele se execută asupra produsului finit, la standul de încercări, și sînt: verificarea raportului de transformare, a grupei de conexiuni, măsurarea rezistențelor înfășurărilor în curent continuu, încercarea cu tensiune aplicată și indusă, măsurarea pierderilor și a curenților de funcționare în gol, măsurarea pierderilor și a tensiunii de scurtcircuit, verificarea etanșeității cuvei la ulei, precum și determinarea tangentei unghiului de pierderi și a rigidității dielectrice a uleiului.

Verificarea raportului de transformare (descrisă în paragraful 2.8.1) *și a grupei de conexiuni* (descrisă în paragraful 2.8.2) sînt foarte importante la respectarea condițiilor de funcționare în paralel a transformatoarelor.

Măsurarea rezistenței înfășurărilor în curent continuu se face conform paragrafului 2.8.3 și constituie o încercare importantă pentru depistarea eventualelor defecte în căile de curent. Atunci cînd se obțin valori măsurate simetrice, însă diferite de cele calculate pe fiecare din cele trei faze sau la cele trei măsurări între bornele de linie, înseamnă că s-a utilizat, pentru confecționarea bobinelor, un conductor cu secțiunea sau rezistivitatea diferite de cele prescrise.

Dacă la înfășurările cu multe prize variația rezistenței măsurate nu concordă cu scoaterea sau introducerea procentului prescris de spire, aceasta indică o conexiune greșită a prizelor, o notație eronată a poziției comutatorului sau un contact nesatisfăcător al comutatorului de prize. Cauzele obținerii unei asimetrii mari (peste 2—3%) între valorile rezistențelor măsurate pe fază sau între bornele de linie, pot fi:

— suduri sau lipituri necorespunzătoare ale conductoarelor;
— contacte la comutator sau la bornele de trecere incorect executate;
— spire scurtcircuitate;
— unul sau mai multe conductoare rupte (la bobinele executate cu mai multe conductoare în paralel).

Stabilirea mai exactă a defectului se face fie după efectuarea și a celorlalte încercări, cum ar fi măsurarea raportului de transformare, proba de scurtcircuit, proba de funcționare în gol, fie se fac măsurări suplimentare.

Avînd în vedere calitățile defectoscopice ale încercării de scurtcircuit brusc, se recomandă refacerea măsurării rezistenței în curent continuu și după proba de scurtcircuit brusc, comparînd rezultatele măsurărilor de rezistență înainte și după proba de scurtcircuit brusc; rezultatele nu trebuie să difere între ele decît în limita preciziei de măsură.

Încercările cu tensiune aplicată și indusă sînt descrise în paragrafele 2.8.4, respectiv 2.8.5. Succesiunea operațiilor pentru determinarea locului defectului în izolație depinde de caracterul defectului, care se stabilește după criterii exterioare (zgomot, încălzire, apariție de fum etc.) sau după indicația aparatelor de măsură și de înregistrare. Prezența unei străpungeri nete a izolației principale poate să fie stabilită prin măsurarea rezistenței de izolație cu un megohmetru, care în acest caz indică „scurtcircuit". Dacă la controlul vizual străpungerea nu se descoperă, atunci încercarea se repetă cu transformatorul decuvat și tensiune redusă. La această încercare cu tensiune aplicată redusă locul defectului se descoperă după apariția fumului sau a unor scîntei în zona avariată a izolației [14].

Prin încercarea de funcționare în gol, descrisă în paragraful 2.8.7, se pot depista următoarele tipuri principale de defecte:

— deteriorarea izolației între tolele miezului;

— deteriorarea izolației pieselor de strîngere a miezului și față de schelă;

— strîngerea necorespunzătoare a miezului feromagnetic, indicată prin zgomot anormal în transformatorul excitat la tensiune nominală;

— încălzirea conexiunii de legare la pămînt, datorată defecțiunii izolației miezului și a pieselor de strîngere;

— defecte în înfășurările transformatorului cum ar fi scurtcircuite între spire sau conexiuni necorespunzătoare la înfășurările executate din conductoare în paralel, care duc la curenți de circulați și, în consecință, la curenți și pierderi la funcționarea în gol mult mai mari.

Prin *încercarea de funcționare în scurtcircuit* se verifică, în special, materialele și calitatea conexiunilor înfășurărilor, ca și parametrii acestora. Această încercare e descrisă în paragraful 2.8.8 și prin ea se pot detecta următoarele defecte:

— pierderi suplimentare și încălziri locale inadmisibile create de cîmpul magnetic de scăpări în piesele părții active (ecrane, inele capacitive și de presare, plăcile schelelor miezului și altele) sau în pereții cuvei transformatorului;

— pierderi suplimentare și încălziri inadmisibile ale capacului cuvei sau ale armăturilor bornelor;

— pierderi suplimentare inadmisibile și încălziri locale în bornele înfășurărilor de curenți mari (la transformatoare pentru cuptoare electrice);

— scurtcircuite între spirele înfășurărilor reactoarelor construite pentru transformatoare (transformatoare cu reglajul tensiunii sub sarcină, folosind reactor pentru limitarea curentului la comutare);

— pierderi suplimentare inadmisibile în înfășurările cu multe conductoare în paralel, în urma scurtcircuitării acestor conductoare sau a greșelilor de transpoziție a acestor conductoare în procesul fabricării înfășurărilor;

— defecte la comutator.

Verificarea etanșeității cuvei la ulei și *încercarea uleiului de transformator* sînt descrise în paragrafele 2.8.11, respectiv 2.8.12.

C. *Probele de tip.* Aceste probe se efectuează asupra prototipului, cu scopul verificării încadrării tuturor caracteristicilor în valorile impuse de caietul de sarcini sau norma produsului. Aceste probe se efectuează în prezența delegatului unei instituții autorizate, pe baza rezultatelor obținute urmînd să se facă sau nu omologarea produsului; ele se repetă, după anumite perioade de

timp, pentru a se verifica, în etapa respectivă, modul de respectare a tehnologiei de fabricație.

În afară de probele de serie, enumerate mai sus, și care sînt obligatorii, la probele de tip se mai efectuează, în plus, următoarele încercări:

— *încercarea la încălzire*, descrisă în paragraful 2.8.9, prin care se verifică, la funcționarea în regim nominal, încadrarea în limitele admise de clasa de izolație folosită, a tuturor încălzirilor (înfășurărilor, miezului, uleiului);

— *încercarea la scurtcircuitul brusc*, descrisă în paragraful 2.8.10, prin care se verifică, în primul rînd, comportarea din punct de vedere mecanic a înfășurărilor supuse solicitărilor electrodinamice.

O importanță deosebită prezintă încercarea la încălzire a transformatorului, deoarece cu ajutorul ei se pot depista chiar în fază incipientă, o serie de defecte.

Localizarea defectelor poate fi:

— în miezul feromagnetic, inclusiv sistemul său de stringere și răcire, unde pot fi neizolări urmate de scurtcircuite și obturări de canale;

— în căile principale de curent, formate din materialul conductor al bobinelor, conexiuni fixe, comutator de prize și treceri izolate, unde pot apărea contacte slabe sau chiar întreruperi;

— în izolația căilor de curent, inclusiv în canalele de răcire ale înfășurărilor, care pot fi obturate;

— în schela metalică, respectiv în sistemul de consolidare a miezului și înfășurărilor, ce poate fi sediul de concentrare a unor pierderi suplimentare mari;

— în sistemul de ecranare a diferitelor elemente din construcția transformatorului, sursă de puncte slabe în izolația transformatorului;

— în sistemele interior și exterior de răcire a transformatorului, putînd acționa neuniform sau defectuos și cu eficacitate redusă.

În general, forma de manifestare a unei deficiențe de construcție sau de execuție care constituie cauza defectării transformatorului, poate să fie:

— apariția arcului electric între electrozi de cupru, aluminiu sau alte metale, în prezența uleiului cald;

— apariția arcului electric între diferite tipuri de metale la limita dintre uleiul fierbinte și gaz;

— descărcări de suprafață între electrozi cu forme ascuțite sau vîrfuri;

— formarea de puncte fierbinți cu temperaturi locale mari (peste limitele admisibile);

— supraîncălzirea căilor de curent izolate cu hîrtie, însoțită de degradarea izolației lor;

— supraîncălzirea căilor de curent neizolate cu hîrtie, dar cufundate în ulei;

— supraîncălzirea contactelor de diferite tipuri (prin lipire, sudare, stringere etc.), însoțite de procese de degradare a lor;

— deteriorarea diferitelor izolații principale sub influența efectelor termice și străpungerii dielectrice;

— deteriorarea izolației conductoarelor prin străpungere dielectrică.

Depistarea unora din aceste defecte este ușurată cu ocazia probei de încălzire, prin:

— anomalii în determinarea încălzirii medii a înfășurărilor prin metoda variației de rezistență;

— curbă de răcire a înfășurărilor mult diferită de o exponențială, cu neregularități și abateri netolerate;

— obținerea unor curbe de încălzire a înfășurărilor, în cazul măsurării lor sub sarcină, cu neregularități și abateri nejustificate;

— încălziri mult diferite de la o fază la alta șau de la o înfășurare la alta;

— nereproducerea rezultatelor obținute în urma repetării unei probe de încălzire, în limitele impuse de precizia măsurărilor;

— abateri mari în determinarea hărții termice exterioare (pe cuvă și elementele de răcire) a transformatorului;

— abateri peste limitele preciziei de măsurare între rezistențele, pierderile de funcționare în gol și de scurtcircuit, măsurate înainte și după proba de încălzire;

— apariția gazelor în transformator.

Defectoscopia transformatorului, pe baza rezultatelor obținute la încălzire, trebuie să se bazeze pe abateri ce depășesc erorile și precizia de măsurare care însoțesc fiecare încercare, erori determinate de calitatea aparatelor și condițiile de lucru. Pentru exploatare, însă, cea mai simplă și operativă metodă de defectoscopie rămîne analiza gazelor, expusă amănunțit în capitolul 6.

Capitolul 5

INSTALAREA, PUNEREA ÎN FUNCȚIUNE, EXPLOATAREA ȘI ÎNTREȚINEREA TRANSFORMATOARELOR

În acest capitol sînt menționate toate măsurile ce trebuie luate de către beneficiar, în colaborare cu fabricantul și alte instituții de resort, din momentul sosirii transformatorului la destinație, în scopul unei corecte instalări și exploatări a acestuia.

5.1. INSTALAREA ȘI PUNEREA ÎN FUNCȚIUNE A TRANSFORMATOARELOR [1, 7]

5.1.1. PREGĂTIREA TRANSFORMATOARELOR PENTRU INSTALARE

În mod uzual, transformatoarele — și în special unitățile de mare putere — se livrează cu o serie de subansambluri și accesorii demontate, fie ca măsură de protecție, fie pentru înscrierea în gabaritele rutiere și feroviare. În consecință, pentru a permite instalarea, sînt necesare o serie de lucrări, care au ca scop readucerea transformatorului în stare complet montat.

Lucrările de pregătire în vederea instalării se organizează în funcție de posibilitățile existente la locul de exploatare. În cazul în care stația este prevăzută cu un turn de decuvare, dotat cu macara de capacitate corespunzătoare, lucrările pregătitoare se execută pe linia de rulare, după care transformatorul, complet montat și echipat cu toate accesoriile, este tractat pe fundație, la locul de instalare. În caz contrar, lucrările se organizează chiar pe locul unde va funcționa transformatorul, folosindu-se o macara mobilă, sau cricuri și schele din traverse de lemn.

În ambele situații, ordinea operațiilor este următoarea :

A. **Montarea cărucioruluі.** Se asamblează casetele roților.

Se verifică dacă ungătoarele axelor roților au vaselină și se strînge fiecare ungător, pînă ce apare vaselină între ax și roată.

Se ridică cuva cu cricurile.

Se introduc casetele roților în locașurile prevăzute la cărucior și se string șuruburile de fixare.

Se așază transformatorul pe roți și se amplasează la locul de funcționare.

Se asigură transformatorului o înclinare de 2—3° (partea conservatorului mai ridicată), introducîndu-se adaosuri speciale sub roți (în cazul în care platforma însăși nu e înclinată).

Se calează roțile transformatorului.

B. **Montarea radiatoarelor.** Înainte de montare, radiatoarele trebuie controlate: dacă se semnalează deteriorări cauzate de transport la suduri și la garnituri, se remediază pe loc.

Se spală radiatoarele cu ulei pentru înlăturarea eventualelor impurităţi depuse în timpul depozitării.

Se verifică poziţia închisă a clapetelor de obturare a racordurilor la cuvă.

Se demontează flanşele oarbe de la cuvă şi de la radiator.

Se pun garniturile de cauciuc special, rezistente la ulei, la fiecare racord.

Se prinde fiecare radiator în macara şi se montează, urmărindu-se introducerea simultană a flanşelor superioare şi inferioare în prezoane şi se string piuliţele, asigurîndu-se etanşeitatea.

Se consolidează radiatoarele cu ajutorul centurilor special prevăzute.

Se montează ventilatoarele (dacă există) şi se fac legăturile electrice respective.

Observaţie: Umplerea radiatoarelor cu ulei se face după montarea completă a transformatorului.

C. **Montarea conservatorului şi a accesoriilor sale.**

Se spală interiorul conservatorului cu ulei.

Se montează indicatorul magnetic al nivelului uleiului fixîndu-se în prealabil flotorul acestuia în poziţia indicată de uzina constructoare la reglarea lui.

Se montează suporturile conservatorului.

Se prinde conservatorul de urechi, se ridică în macara şi se montează cu buloane pe capac.

Se pregăteşte pentru montaj releul Buchholz, deblocîndu-i-se flotoarele.

Se montează racordul conservator — releu Buchholz — cuvă, şi racordul sistemului de aerisire.

Observaţie: La toate aceste operaţii se va da o mare atenţie etanşeităţii.

D. **Montarea izolatoarelor.** Izolatoarele pînă la 35 kV se montează pe capac cu ajutorul unor cleme şi piuliţe de strîngere pe bolţurile flanşei, sau cu coliere semicirculare din siluminiu. Între suprafaţa izolatorului şi clemele de strîngere sau coliere se pun bucăţi de tablă din aluminiu, pentru a preveni spargerea porţelanului. La aceste izolatoare, legătura la bornă se face prin fereastra specială de vizitare, introducîndu-se papucul legăturii pe bornă şi fixîndu-se cu piuliţă.

Izolatoarele tip condensator, de la 21 kV în sus, se fixează pe capac folosindu-se flanşa acestora, cu ajutorul piuliţelor sau al şuruburilor filetate pînă sub cap. Înainte de fixarea izolatoarelor, se asigură printr-un mijloc oarecare (cablu subţire, sfoară etc.) posibilitatea de a trage ulterior conductorul flexibil prin gaura izolatorului.

Se fixează fiecare izolator pe capac şi se fac legăturile la borne.

La montarea izolatoarelor se va avea în vedere asigurarea etanşeităţii.

E. **Montarea accesoriilor de pe cuvă şi capac.**

Se verifică membrana supapei de siguranţă, se spală interiorul supapei cu ulei şi se montează pe capac.

Se demontează legătura filtrului de aer, făcută la capac pentru durata transportului.

Se montează filtrul la locul lui pe cuvă și se racordează la conservator, asigurîndu-se etanșeitatea.

Se verifică starea silicagelului (eventual se înlocuiește cu unul proaspăt, deshidratat).

Se verifică starea și cantitatea uleiului din baia filtrului, completîndu-se sau eventual înlocuindu-se.

Se înșurubează elementul de măsură al termometrului manometric în locașul său de pe capac, se întinde tubul capilar și se așază indicatorul pe suport.

Se montează, dacă există, semnalizatorul termic în locașul prevăzut pe capac.

Se montează termometrul cu mercur, împreună cu teaca sa.

Se face punerea la pămînt a transformatorului.

F. Montarea circuitelor auxiliare de protecție și măsurare. Circuitele auxiliare sînt montate pe transformator în tuburi de protecție încă din uzină. La locul de montaj se verifică continuitatea lor, se fac legăturile la aparate, conform schemei circuitelor auxiliare, după care se execută probele de funcționare a circuitelor.

Se verifică circuitele instalației de comandă a suflajului de aer (dacă există).

Se verifică dacă releele termice nu au declanșat cumva datorită trepidațiilor din timpul transportului sau dacă nu s-au dereglat.

G. Umplerea cu ulei.

Se verifică rigiditatea dielectrică a uleiului din cuvă. Dacă valoarea ei este sub 80% din valoarea prescrisă, este necesară regenerarea uleiului în circuit închis, cu o instalație de filtrare și regenerare a uleiului.

Se verifică rigiditatea dielectrică a uleiului de completare din butoaie și se procedează ca mai sus. Dacă uleiul este corespunzător, se trece la umplerea cu ulei a transformatorului prin racordarea pompei de ulei la robinetul de golire din partea de jos a cuvei.

Pentru umplerea unui radiator se deschide numai clapeta racordului său inferior și bușonul de aerisire. Cînd radiatorul este aproape umplut, se deschide și clapeta sa superioară. Umplerea completă a radiatorului cu ulei este semnalată de apariția uleiului la bușonul de aerisire. În acest moment, bușonul se închide. Se procedează la fel pentru fiecare radiator, avîndu-se grijă ca să se pompeze ulei în continuare, pentru ca nivelul uleiului din cuvă să nu scadă.

După ce s-au umplut radiatoarele, se deschide robinetul dinspre conservator și se continuă umplerea pînă cînd indicatorul de nivel arată poziția „plin".

5.1.2. PREGĂTIREA TRANSFORMATOARELOR PENTRU PUNEREA ÎN FUNCȚIUNE

Înainte de punerea în funcțiune, transformatoarele se supun la o serie de probe și verificări conform prescripțiilor de exploatare PE 003/79, cu scopul de a asigura funcționarea corectă și fără avarii.

TABELUL 5.1

Încercarea uleiurilor electroizolante

Nr. crt.	Denumirea probei	Condițiile de execuție a probei și valori admisibile
0	1	2
1	Aspect	Examinare vizuală a unei probe de ulei luată într-un pahar de 250 cm³: *limpede*
2	Cărbune în suspensie	Examinarea se face vizual, în vasul aparatului, pentru determinarea rigidității dielectrice: *lipsă*. În cazul prezenței cărbunelui, uleiul se recondiționează fizic.
3	Prezența apei în ulei	Examinarea se face prin metoda crepitării (pocniturilor) într-o eprubetă încălzită, la flacăra de gaze: *nu trebuie să se audă pocnituri*.
4	Punctul de inflamabilitate Pensky-Martens	Se execută conform STAS 5488-80, în creuzet închis, sau conform STAS 5489-80, în creuzet deschis (metoda Marcusson). Valori admise, minimum °C: Ulei | STAS 5488-80 | STAS 5489-80 Ulei nou și nou recondiționat | 140 | 145 Ulei din exploatare | 135 | 140
5	Punct de congelare	Se execută conform STAS 39-80. Valori admise, pentru ulei nou și nou recondiționat fizic, −40°C.
6	Aciditate organică (indice de neutralizare)	Se execută conform STAS 23-75. Valori admisibile: Ulei | Valori maxime mg KOH/g Nou, nou recondiționat fizic: — neaditivat | 0,03 — aditivat | 0,06 Din exploatare în echipamente cu tensiunea: ≤ 20 kV | 0,50 35–110 kV | 0,30 220–400 kV | 0,20
7	Impurități mecanice (substanțe insolubile în solvenți organici)	Determinările se fac conform STAS 33-78: *lipsă*. Această analiză se face atunci când probele electrice nu ies corespunzătoare și când uleiul are aspect necorespunzător.
8	Stabilitate la oxidare	Proba se execută conform STAS 8798/1-82 și numai asupra uleiului nou, atunci când este necesară amestecarea a două uleiuri sau când există dubii asupra calității uleiului recepționat. Valorile trebuie să corespundă STAS 811-83 și anume: Caracteristica | Valori admise — indice neutralizare, mg KOH/g, maxim | 0,30 — gudroane, % maxim | 0,10 — tangenta unghiului de pierderi la 90°C, max. | 0,15

<table>
<tr><th>0</th><th>1</th><th colspan="5">2</th></tr>
<tr><td rowspan="4">9</td><td rowspan="4">Tensiune interfacială apă-ulei electroizolant</td><td colspan="5">Determinarea se face conform STAS 9654-74 și numai atunci cînd rezultatele analizei complete sînt neconcludente.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Ulei</td><td colspan="3">$\sigma_{u/a}$, dyn/cm = 10^{-3} N/m</td></tr>
<tr><td colspan="2">nou și nou recondiționat fizic</td><td colspan="3">min. 40</td></tr>
<tr><td colspan="2">ulei din exploatare</td><td colspan="3">min. 20</td></tr>
<tr><td>10</td><td>Conținutul de gaze în ulei</td><td colspan="5">Proba se face de către un laborator specializat și servește ca metodă preventivă de urmărire în exploatare a transformatoarelor de mare putere (200—400 MVA) și foarte înaltă tensiune (110—400 kV).</td></tr>
<tr><td rowspan="5">11</td><td rowspan="5">Conținut de apă</td><td colspan="5">Metoda Karl-Fischer. Determinarea se face conform STAS 7041-70. Limita maximă admisă la transformatoarele de 220—400 kV:</td></tr>
<tr><td colspan="2">Ulei</td><td colspan="3">Conținut de apă maxim. p.p.m. (părți per milion)</td></tr>
<tr><td colspan="2">nou recondiționat fizic</td><td colspan="3">10</td></tr>
<tr><td colspan="2">la punerea în funcțiune</td><td colspan="3">20</td></tr>
<tr><td colspan="2">din exploatare</td><td colspan="3">30</td></tr>
<tr><td rowspan="7">12</td><td rowspan="7">Rigiditatea dielectrică</td><td colspan="5">Se execută conform STAS 286-81. Temperatura minimă a uleiului pentru probe să fie de +10°C. Valorile măsurate trebuie să fie superioare următoarelor limite:</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Ocazia măsurării</td><td colspan="4">Rigiditatea dielectrică minimă (kV/cm) pentru tensiunea mare a transformatorului</td></tr>
<tr><td>6—35 kV</td><td>60—110 kV</td><td>220 kV</td><td>400 kV</td></tr>
<tr><td>— înainte de umplere (nou și nou recondiționat fizic)</td><td>200</td><td>220</td><td>220</td><td>240</td></tr>
<tr><td>— la 72 ore după umplere</td><td>180</td><td>200</td><td>220</td><td>240</td></tr>
<tr><td>— la punerea în funcțiune</td><td>160</td><td>180</td><td>200</td><td>220</td></tr>
<tr><td>— în exploatare</td><td>120</td><td>160</td><td>180</td><td>200</td></tr>
</table>

TABELUL 5.1 (continuare)

0	1	2				
13	Tangenta unghiului de pierderi dielectrice	Se execută conform STAS 6799-81 la o temperatură a uleiului de 90°C.				
		Ocazia măsurării	Valoarea maximă a tgδ la 90°C			
			6–35 kV	60–110kV	220 kV	400 kV
		— înainte de umplere	0,005	0,005	0,005	0,005
		— la 72 ore după umplere	0,02	0,02	0,015	0,015
		— la punerea în funcțiune și după reparații în ateliere specializate	0,03	0,025	0,02	0,02
		— în exploatare	0,20	0,15	0,10	0,07

Principalele încercări, efectuate de fabricile constructoare ale transformatoarelor din care o parte se reiau la beneficiar, cu ocazia punerii în funcțiune, sînt expuse, în paragraful 2.8.

Asemenea probe se fac fie la prima utilizare (transformator nou), fie după reparații care au necesitat decuvarea.

În cele ce urmează, se prezintă cele mai semnificative probe și verificări preliminare, enumerate în PE 003/79, precum și modul succint de execuție a acestora, menționat în PE 116/84.

A. **Încercarea uleiului** constă dintr-o serie de determinări descrise în Prescripțiile de Exploatare PE 116/84, care se execută obligatoriu atît asupra uleiului din cuvă, cît și asupra uleiului de completare transportat separat în butoaie. Enumerarea sumară a acestor încercări este indicată în tabelul 5.1.

B. **Măsurarea rezistenței de izolație** a înfășurărilor transformatorului R_{i60} și a *coeficientului de absorbție* $k_a = \frac{R_{i60}}{R_{i15}}$, se execută conform STAS 1703/7-80 și instrucțiunilor de exploatare. Aceste măsurători se fac înainte de determinarea $tg\delta$ și a capacității înfășurărilor, precum și înainte și după proba cu tensiune mărită.

Pentru a putea face comparație cu valorile măsurate anterior, se recomandă folosirea aceluiași tip de megohmetru și anume avînd tensiunea de:

— 1 000 V, pentru înfășurări pînă la 10 kV inclusiv;

— 2 500 V, pentru înfășurări peste 10 kV inclusiv.

Se rotește uniform manivela megohmetrului cu viteza de aproximativ 120 rot/min timp de 60 s, notîndu-se indicațiile aparatului la 15 s (R_{i15})

şi la 60 s (R_{iz60}). Măsurătorile se vor executa la o temperatură a izolaţiei apropiată de cea indicată în buletinul fabricii constructoare; abaterea maximă pentru transformatoarele de peste 10 MVA este de ± 5°C.

La transformatoarele sub 10 MVA, coeficientul k_1 de variaţie a rezistenţei de izolaţie în funcţie de diferenţa de temperatură $\Delta t = t_2 - t$ în °C, dintre cea indicată în buletinul fabricii constructoare $R_{iz60(t_2)}$ şi cea care ar fi rezultat în fabrică la temperatura t_1, de la punerea în funcţiune $R_{iz60(t_1)}$ este dat în tabelul 5.2.

TABELUL 5.2

Coeficientul k_1 de variaţie a rezistenţei de izolaţie în funcţie de diferenţa de temperatură între măsurătorile R_{iz60} în fabrică şi la punerea în funcţiune.

Δt [°C]	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
k_1	1,04	1,08	1,13	1,17	1,22	1,5	1,84	2,25	2,75	3,4	4,15	5,1	6,2	7,5	9,2	11,2	13,9	17

Pentru transformatoarele noi, la punerea în funcţiune, valoarea lui $R_{iz60(t1)}$ nu va scădea sub 70% din valoarea de fabrică.

Dacă măsurătoarea lui R_{iz60} la punerea în funcţiune, se face la altă temperatură t_1, diferită de cea indicată în buletinul fabricii constructoare t_2, atunci, în scopul comparării valorilor obţinute la măsurare cu cele din buletin, este necesară mai întîi recalcularea valorii de fabrică la temperatura t_1 care se face astfel:

a) dacă $t_2 > t_1 \rightarrow R_{iz60(t_1)} = kR_{iz60(t_2)}$;

$$\text{b) dacă } t_2 < t_1 \rightarrow R_{iz60(t_1)} = \frac{1}{k_1} R_{iz60(t_2)}. \tag{5.1}$$

Valoarea măsurată deci, se compară cu cea recalculată.

De exemplu, în buletinul de fabrică $R_{iz60(t_2)}$ măsurată între înfăşurarea de înaltă tensiune şi înfăşurarea de joasă tensiune pusă la masă, este de 1 450 MΩ la $t_2 = 21$°C.

În timpul măsurării la punerea în funcţiune, temperatura este $t_1 = 18$°C, deci

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 3\text{°C}.$$

Pentru această diferenţă de temperatură din tabelul 5.2 rezultă $k_1 = 1{,}13$. Deci rezistenţa de izolaţie din buletin recalculată la 18°C va fi

$$R_{iz60(t_1)} = 1\,450 k_1 = 1\,450 \cdot 1{,}13 = 1\,639 \text{ M}\Omega. \tag{5.2}$$

Cum la punerea în funcţiune a transformatorului valoarea lui $R_{iz60(măs)}$, nu trebuie să scadă sub 70% din valoarea de fabrică, rezultă că $R_{iz60(măs)}$ este bună dacă se obţine la măsurătoare valoarea $R_{iz60(măs)} \geqslant 0{,}7 \cdot 1\,639 = 1\,147$ MΩ.

Dacă t_1 ar fi fost mai mare decît t_2 atunci, în relația (5.2), $R_{iz60(t_2)}$ ar fi scăzut de k_1 ori (în loc de înmulțire cu k_1, trebuia efectuată împărțirea cu k_1).

Ulterior în exploatare, valoarea R_{iz60} nu va scădea sub valorile minime admise indicate în tabelul 5.3.

TABELUL 5.3

Valorile minime admise ale rezistenței de izolație (R_{iz60}) în MΩ, a transformatoarelor existente în exploatare la temperaturile izolației de 20°C și 50°C

U_N[kV]	R_{iz60} [MΩ]	
	20°C	50°C
≤60	300	90
110–220	600	180
400	1 000	300

Pentru înfășurările cu $U_N \leq 500$ V, la care nu există buletine ale fabricii, valoarea minimă a rezistenței de izolație la 20°C, va fi de 2 MΩ.

Coeficientul de absorbție pentru transformatoarele aflate deja în exploatare considerînd o stare satisfăcătoare a izolației interne, trebuie să aibă la 20°C, valorile:

$k_a \geq 1{,}2$ pentru transformatoarele cu $U_N < 110$ kV;

$k_a \geq 1{,}3$ pentru transformatoarele cu $U_N \geq 110$ kV.

Ca urmare a umezirii izolației sau a unor defecte ale acesteia, valoarea lui k_a se micșorează, apropiindu-se de 1.

C. **Măsurarea tangentei unghiului de pierderi dielectrice** (*tg δ*) a izolației complexe a înfășurărilor, se execută conform STAS 1703/7 – 80 și instrucțiunilor de exploatare. Măsurătoarea se efectuează după verificarea rezistenței de izolație și coeficientului de absorbție și înainte de proba cu tensiune mărită a izolației transformatorului.

Tensiunea de măsură este de 10 kV pentru înfășurările cu $U_N \geq 10$ kV, iar pentru înfășurările cu $U_N < 10$ kV, tensiunea de măsură va fi cea nominală a înfășurării respective.

Înainte de începerea măsurări toate înfășurările se pun la pămînt cel puțin 5 minute, iar între încercări toate înfășurările vor fi puse la pămînt cel puțin 2 minute.

Măsurătorile se execută la o temperatură a izolației, apropiată de cea indicată în buletinul de fabrică (**abatere maximă admisă de ± 5°C**), dar nu mai mică de + 10°C.

Coeficientul k_2 de variație al valorii *tg δ*, în funcție de diferența de temperatură $\Delta t = t_2 - t_1$, în °C, este dat în tabelul 5.4.

TABELUL 5.4

Coeficientul k_2 de variație a mărimii tg δ, în funcție de diferența de temperatură Δt, în °C.

Δt [°C]	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
k_2	1,03	1,06	1,09	1,12	1,15	1,25	1,51	1,75	2	2,3	2,65	3	3,5	4	4,6	5,3	6,1	7

Recalcularea valorii $tg\delta$ de la temperatura t_2 din buletinul de încercare la temperatura t_1, la care se efectuează măsurătoarea, în vederea aprecierii valorii măsurate la punerea în funcțiune, se face cu relațiile:

a) Dacă $t_2 > t_1 \rightarrow tg\delta(t_1) = \frac{1}{k_2} tg\delta(t_2)$;

b) Dacă $t_2 < t_1 \rightarrow tg\delta(t_1) = k_2 tg\delta(t_2)$, (5.3)

unde k_2 se ia din tabelul 5.4, pentru $\Delta t = |t_2 - t_1|$, în °C.

Valoarea măsurată a tgδ, pentru transformatoarele noi, la punerea în funcțiune, nu trebuie să depășească cu mai mult de 30%, valoarea de fabrică recalculată cu relațiile (5.3).

Pentru transformatoarele reparate, se vor lua drept valori maxime la temperatura izolației de 20°C, următoarele:

— pentru $U_N \leqslant 35$ kV, $tg\delta \leqslant 2\%$;

— pentru $U_N > 35$ kV, $tg\delta \leqslant 1\%$.

Pentru transformatoarele din exploatare, valorile maxime admise pentru $tg\delta$, sînt indicate în tabelul 5.5.

D. **Măsurarea trecerilor izolate tip condensator**, în izolații combinate, care sînt următoarele:

a) *Măsurarea rezistenței de izolație*, care se execută cu megohmetrul de 2 500 V, de preferință în perioada aprilie—septembrie, dar nu la temperaturi mai mici de +10°C. Rezultatele măsurătorilor se vor compara cu datele de fabrică: în lipsa acestora $R_{iz} \geqslant 2\,500$ MΩ. Valorile rezistenței R_t la temperatura t, se vor aduce la valoarea R_{20}, corespunzătoare temperaturii de 20°C, cu relația

$$R_{iz20} = k_R R_t,$$

unde k_R, se ia din tabelul 5.6.

TABELUL 5.5

Valorile maxime admise ale mărimii tgδ, la 20°C și 50°C, pentru transformatoarele din exploatare

U_N [kV]	tg δ [%]	
	20°C	50°C
<10	4	11
10—60	2,5	7
110—220	2,5	7
400	1,5	2,5

TABELUL 5.6

Valorile coeficientului k_R de recalculare a rezistenței de izolație a trecerilor tip condensator

t [°C]	10	15	20	25	30	35	40
k_R	0,67	0,82	1,0	1,25	1,31	1,83	2,45

Pentru trecerile izolate prevăzute cu priză de măsură, se va măsura și valoarea rezistenței de izolație a prizei față de masă, cît și față de priza de tensiune, dacă există. Ambele valori trebuie să aibă $R_{iz} \geqslant 100$ MΩ.

b) *Încercarea cu tensiune mărită alternativă 50 Hz* se face cu trecerile izolate pentru traversări prin pereți, demontate de la bare, iar cu trecerile izolate de pe transformator, demontate, însă cu partea inferioară cufundată în ulei.

La punerea în funcțiune se pot lua în considerație buletinele de fabrică, dacă nu sînt mai vechi de un an.

Tensiunile de încercare pentru trecerile izolate noi sînt conform STAS 6391-77, indicate în tabelul 5.7.

TABELUL 5.7

Valorile tensiunilor de încercare pentru trecerile izolate noi

U_1 [kV]	123	145	170	205	245	420
U_{inc} [kV]	185	230	275	325	395	630

Trecerile izolate din exploatare se vor încerca la 0,8 din valorile indicate în tabelul 5.7. Încercarea va dura 1 minut și se consideră bună, dacă nu apar străpungeri sau conturnări în aer sau ulei, ori încălziri sensibile ale părților izolante organice.

c) *Măsurarea tgδ*, se efectuează de preferință în perioada aprilie—septembrie, dar nu la temperaturi mai mici de + 10°C. Trecerile izolate se măsoară demontate de la bare. Valorile măsurate la temperatura *t*, vor fi raportate la temperatura de 20°C, prin inmulțire cu coeficientul de corecție care se ia, în funcție de tipul trecerii, din PE 116/84 pagina 111 ; la punerea în funcțiune se vor lua în considerare buletinele de fabrică față de care se admite o creștere de 35%.

E. **Măsurarea rezistenței ohmice a înfășurărilor** se face pentru fiecare înfășurare, pe fiecare fază și pe fiecare priză, conform STAS 1703/7-80 și instrucțiunilor de exploatare. La transformatoarele cu neutrul inaccesibil, se vor măsura rezistențele între faze și se vor determina prin calcul rezistențele de fază. Măsurarea se execută cu puntea de măsură sau prin metoda voltmetrului și ampermetrului, cînd intensitatea curentului continuu trebuie să fie cu 20% mai mare decît curentul de funcționare în gol indicat în buletinul de fabrică, în scopul saturării miezului magnetic, ceea ce duce la scurtarea timpului de stabilizare al indicațiilor aparatelor de măsură, timp care în anumite cazuri poate depăși 30 minute.

Raportarea rezistenței măsurată la temperatura t_1, la temperatura t_2 din buletinul de încercare se face pentru înfășurarea din cupru, cu relația

$$R_{t2} = R_{t1} \frac{235 + t_2}{235 + t_1}. \qquad (5.4)$$

Rezistențele înfășurărilor diferitelor faze măsurate pe aceleași prize, nu trebuie să difere între ele sau față de datele de fabrică, cu mai mult de 2%.

F. **Verificarea grupei de conexiuni și a polarității,** care trebuie să corespundă datelor înscrise pe eticheta de fabricație, iar polaritățile, schemei și notațiilor de pe transformator.

G. **Măsurarea raportului de transformare,** se execută conform STAS 1703/7-80. Verificarea se face începînd alimentarea cu tensiune joasă de 1—2% din tensiunea nominală. Raportul de transformare nu trebuie să difere

cu mai mult de 0,5%, față de cel măsurat și indicat în buletinul de fabrică, eroarea fiind aceeași ca mărime și sens pe toate ploturile (prizele înfășurării) comutatorului.

H. **Măsurarea pierderilor și a curentului de funcționare în gol**, atît la tensiune scăzută (400—500 V), cît și la tensiune nominală.

Încercarea se execută conform STAS 1703/7-80, la punerea în funcțiune, numai în lipsa buletinului de fabrică și de regulă la transformatoarele de peste 10 MVA inclusiv și peste 110 kV inclusiv. Proba se execută de preferință înaintea măsurării rezistenței de izolație și a rezistențelor ohmice; în caz contrar este necesară în prealabil demagnetizarea miezului.

Valoarea pierderilor nu trebuie să difere cu mai mult de 5% față de cele din fabrică, iar curentul de funcționare în gol cu mai mult de 10%.

I. **Măsurarea tensiunii de scurtcircuit și pierderilor la sarcină nominală** (I_N) sau redusă, se execută conform STAS 1703/7-80, folosindu-se aceleași scheme și aparate ca la funcționarea în gol. Verificarea se execută la punerea în funcțiune, numai în lipsa buletinului de fabrică. Abaterile admise vor fi:

— pentru transformatoare cu $S_N \leqslant 6{,}3$ MVA și $U_N \leqslant 35$ kV, abaterea $\leqslant \pm 1\%$ din u_{kN} în %;

— pentru transformatoare cu $S_N \geqslant 10$ MVA și $U_N \geqslant 110$ kV, abaterea $\leqslant 2\%$ din u_{kN} în %;

— pentru pierderile în scurtcircuit, abaterea $\leqslant 5\%$ din valoarea nominală. Abaterile se consideră față de valorile rezultate în fabrică.

J. **Verificarea rigidității dielectrice cu tensiune sinusoidală aplicată și indusă de frecvență 50 Hz sau mărită.** Verificarea se face asupra transformatorului complet montat și numai dacă rezultatele încercărilor de la punctele A, B, C și D corespund.

La punerea în funcțiune a transformatoarelor cu $U_N \geqslant 60$ kV se vor lua în considerare buletinele de încercare ale furnizorului. La transformatoarele cu $U_N \leqslant 35$ kV, dacă buletinul lipsește, proba se execută obligatoriu la punerea în funcțiune.

Comutatorul se pune pe priza nominală, dacă nu se prevede altfel de către fabricant. Valorile tensiunilor de încercare vor fi:

— pentru transformatoarele noi sau reparate, dar la care nu s-au înlocuit înfășurările sau izolația principală: $U_{înc} = 75\% \; U_{if}$, unde U_{if} este valoarea tensiunii de încercare în fabrică, sau în lipsa acesteia, valorile din STAS 1703/7-80, tabelul 2 (v. tab. 2.5);

— pentru transformatoarele reparate cu înlocuirea parțială a înfășurărilor sau izolației principale: $U_{înc} = 85\% \; U_{if}$;

— pentru transformatoarele reparate cu înlocuirea totală a înfășurărilor: $U_{înc} = U_{if}$.

Timpul de încercare:

— $T = 1$ minut, la tensiune aplicată la 50 Hz;

— $T = 60 \frac{100}{f}$ (s), la tensiune indusă de frecvență mărită f.

Verificarea corespunde, dacă nu apar străpungeri sau conturnări ale izolației, gaze sau alte anomalii.

După această încercare se măsoară din nou, pierderile și curentul de funcționare în gol, precum și R_{i60} și $k_a = R_{i60}/R_{i15}$.

K. **Încercarea izolației cu tensiune mărită indusă trifazată la 50 Hz.** Neutrul înfășurărilor se leagă la pămînt. Valorile tensiunilor de încercare sînt:

$U_{inc} = (1,1 - 1,3)U_N$ (obișnuit $U_{inc} \approx 1,15$ U_N), la transformatoarele la care se folosesc buloane pentru strîngerea miezului;

$U_{inc} = (1,2 - 1,3)U_N$, la celelalte transformatoare.

Izolația trebuie să reziste timp de 1 minut, fără să apară străpungeri, conturări sau alte anomalii.

După această încercare se măsoară din nou raportul de transformare, pierderile și curentul de funcționare în gol, precum și R_{izol}.

L. **Verificarea corespondenței fazelor,** se execută cu transformatorul montat. Fazele trebuie să corespundă notației de pe transformator și fazelor sistemului.

M. **Verificarea etanșeității cuvei,** la scurgeri de ulei, se face la suprapresiune timp de 5 ore astfel:

— pentru cuve netede sau cu țevi, la presiunea de 0,6 m coloană ulei;

— pentru cuve ondulate sau cu radiatoare, la presiunea de 0,3 m coloană ulei.

Suprapresiunea se obține prin racordarea la conservator sau la robinetul (vana) de pe capac (dacă transformatorul este fără conservator) a unui tub ermetic ce se umple cu ulei pînă la înălțimea necesară. Se vor închide alte orificii ale transformatorului.

Temperatura uleiului nu va fi mai mică de + 10°C.

Transformatoarele de tip etanș se vor încerca la presiunea indicată de fabricant (orientativ: 0,5 bari, timp de 24 ore, iar 1 bar = 10^5 Pa).

Nu trebuie să apară scurgeri pe la garnituri sau la robinete, vane, clapete, suduri sau în alte părți.

N. **Verificarea înclinării conductelor de legătură între transformator și conservator și a capacului transformatorului,** trebuie să ducă la concluzia că înclinarea în sus a capacului în direcția releului de gaze trebuie să fie de 1—2%.

Conducta de ulei de la transformator spre conservator, trebuie să aibă o pantă urcătoare spre releul de gaze de 2—4%.

În afară de verificările mai importante menționate mai sus, în perioada de pregătire și executare a montajului, pentru punerea în funcțiune a transformatoarelor, se mai efectuează verificări și asupra bunei funcționări a elementelor instalațiilor principale ca: traductoare de temperatură, baterii de răcire, transformatoare de măsură și elementele de protecție a cuvei și de protecție la supratensiuni atmosferice.

5.1.3. PUNEREA ÎN FUNCȚIUNE A TRANSFORMATOARELOR

În perioada de punere în funcțiune și exploatare de probă a transformatoarelor și autotransformatoarelor de putere, se fac, în mod obligatoriu, următoarele măsurători și probe, conform PE 003/79:

1) măsurarea rezistențelor de izolație și a coeficientului de absorbție;

2) proba funcţională a comenzilor şi blocajelor pentru toate întreruptoarele şi separatoarele aferente;

3) proba acţionării elementelor de protecţie asupra întreruptoarelor şi semnalizările respective;

4) proba funcţionării instalaţiei de răcire şi măsurare a temperaturii;

5) proba funcţionării comutatorului de ploturi;

6) proba funcţionării instalaţiei de stingere a incendiilor;

7) măsurarea tensiunii şi a pierderilor de scurtcircuit;

8) verificarea pe viu, adică în timpul funcţionării transformatorului, a protecţiilor şi ridicarea diagramelor fazoriale în circuitele aferente protecţiilor şi măsurării;

9) conectarea transformatoarelor la tensiunea nominală timp de 30 minute şi efectuarea a 3 pînă la 5 conectări şi deconectări pentru verificarea comportării;

10) verificarea la funcţionare în sarcină a indicaţiilor instrumentelor de măsură şi a orientării elementelor direcţionale din releele de protecţie;

11) proba complexă de 72 de ore.

Cum se observă, probele tehnologice pentru punerea în funcţiune a transformatoarelor se încheie cu proba complexă de 72 de ore, care constă în funcţionarea neîntreruptă a transformatorului la încărcarea nominală (în cazuri speciale chiar la sarcina maximă posibilă, stabilită anterior de furnizor şi beneficiar), în condiţiile respectării parametrilor nominali de funcţionare.

5.1.4. USCAREA TRANSFORMATOARELOR

A. **Comportarea izolaţiei de hîrtie a transformatoarelor.** Comportarea în exploatare a izolaţiei de hîrtie a transformatoarelor este influenţată de două fenomene:

— absorbţia de către hîrtie a apei din ulei, deoarece hîrtia are o mare afinitate pentru apă;

— îmbătrînirea izolaţiei, adică scăderea în timp sub anumite limite admise a proprietăţilor electroizolante.

Cercetările au arătat că celuloza (hîrtia), în prezenţa uleiului saturat cu aer, îmbătrîneşte de două ori mai repede decît în prezenţa unui ulei complet fără aer. Din acest motiv este necesar să se ia măsuri care să asigure protejarea uleiului din transformator contra contactului cu aerul. În acest scop transformatorul trebuie uscat sub vid, în mod satisfăcător şi umplut cu ulei la o presiune reziduală cît mai mică (aproximativ 3 kPa).

Materialele electroizolante pe bază de celuloză preiau o anumită cantitate de umiditate din atmosferă.

Uleiul în contact cu atmosfera din conservator dizolvă lent apa din atmosferă, iar apoi aceasta este absorbită de izolaţia pe bază de hîrtie a transformatorului.

S-a constatat că după 10 ani de exploatare, la un transformator de putere medie sau mare, prevăzut cu conservator şi aparat cu silicagel, izolaţia de hîrtie poate conţine umiditate în proporţie de 3—5%, adică de cca 10 ori mai mare decît cea iniţială (aproximativ 0,5%).

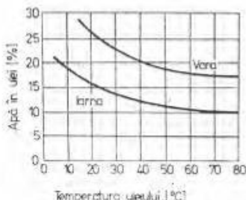


Figura 5.1. Cantitatea de apă în uleiul de transformator, în condiții de echilibru.

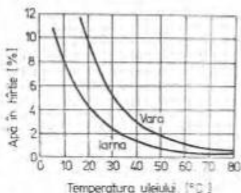


Figura 5.2. Cantitatea de apă din izolația de hîrtie, după anotimpuri, în zona temperată.

Rezultă că, datorită higroscopicității ridicate a izolației de hîrtie, aceasta absoarbe din ulei importante cantități de apă. În figura 5.1 se dau curbele cantității de apă în ulei, iar în figura 5.2 curbele conținutului de apă din izolația de hîrtie, după anotimpuri, pentru zona temperată. Curbele au caracter orientativ, permițînd totuși stabilirea unor concluzii practice importante. Astfel, din aceste curbe rezultă că izolația unui transformator încărcat în mod corespunzător, în exploatare cînd temperatura lui este ridicată, se menține în bune condițiuni, fără măsuri speciale. Dimpotrivă, izolația unui transformator aflat în rezervă sau în stare de depozitare absoarbe umiditatea din mediul ambiant, deoarece uleiul are și el temperatura acestuia. La temperaturi ale mediului ambiant în jur de 10°C, conținutul de umiditate din izolația de hîrtie devine periculos pentru calitățile izolante ale hîrtiei, cu toate că uleiul are un conținut redus de apă. De aceea, este necesar a se efectua controlul periodic al rezistenței de izolație a transformatoarelor aflate în rezervă, și alternarea lor în funcționare, astfel încît fiecare transformator să stea în rezervă un timp cît mai scurt.

În stare de depozitare a transformatorului, silicagelul previne în măsură suficientă umezirea uleiului și a izolației, cu condiția ca uleiul să fi avut calitățile corespunzătoare la umplerea transformatorului, iar silicagelul să fie bine întreținut.

Rezistența la oxidare a uleiului se poate îmbunătăți prin adăugarea în ulei a unor substanțe care împiedică oxidarea uleiului, denumite *inhibitori de oxidare*, sau prin închiderea ermetică a transformatorului cu atmosferă de azot în conservator. Prezența inhibitorilor în ulei poate decala procesul de îmbătrînire al uleiului la 15—20 ani de funcționare.

B. **Uscarea transformatoarelor.** Necesitatea uscării transformatoarelor apare în cazul umezirii înfășurării sau după reparații, în cadrul cărora se înlocuiesc total sau parțial înfășurările sau izolația. În ultimul caz, uscarea se face independent de valoarea rezistenței de izolație.

Criteriile după care se stabilește necesitatea uscării transformatoarelor sînt următoarele:

— transformatoarele cu tensiunea pînă la 35 kV, după reparație capitală, pot fi conectate la rețea fără uscarea prealabilă dacă partea lor decuvabilă nu s-a aflat în contact mai mult de 24 ore cu un mediu cu umiditate relativă mai mare de 75%;

— dacă în timpul reparării, temperatura părții decuvabile este mai mare decît temperatura aerului cu cel puțin 3—5°C, durata admisibilă de ședere a părții decuvabile în aer este de trei ori mai mare (adică 72 h);

— transformatorul poate fi demontat pentru reparație cu condiția ca temperatura aerului înconjurător să fie egală sau mai mică decît temperatura straturilor superioare ale uleiului transformatorului. În cazul că umiditatea relativă a aerului depășește 75%, temperatura straturilor superioare ale uleiului înainte de demontarea transformatorului trebuie să depășească temperatura aerului cu cel puțin 10°C.

Necesitatea uscării transformatoarelor după reparațiile capitale, în cazul în care părțile lor decuvabile au fost în contact cu aerul mai mult decît termenele indicate mai sus, se determină pe baza măsurării rezistenței de izolație, a capacității și tangentei unghiului de pierderi (tgδ), conform celor menționate anterior la paragrafele 5.1.2 și 5.1.3, cînd valorile acestora nu se încadrează în limitele admise.

Uscarea transformatoarelor se poate face prin mai multe metode: uscarea în cuvă proprie sub vid și încălzire, uscarea în cuvă proprie fără vid, uscarea prin suflare cu aer cald, uscarea cu raze infraroșii, uscarea cu curent electric, uscarea prin tratarea uleiului în circuit închis etc.

Alegerea metodei de uscare depinde de posibilitățile locale, de mărimea și tipul transformatorului. Cele mai folosite sînt metodele a doua și, din ce în ce mai mult, ultima, metode care se vor descrie în continuare.

a. *Uscarea transformatorului în cuvă proprie, fără vid.* Înainte de uscare, se scoate uleiul din cuvă, iar cuva se șterge pînă cînd se usucă. Pe partea decuvabilă a transformatorului se așază termocupluri sau termorezistențe pentru controlul temperaturii. Partea decuvabilă se introduce în cuvă și se acoperă cu capacul.

Exteriorul cuvei transformatorului se izolează cu foi de azbest, apoi, peste acestea se înfășoară spirele de magnetizare care constituie înfășurarea de magnetizare. Dacă transformatorul are radiatoare demontabile, acestea se scot în prealabil. În cazul cuvei prevăzute cu nervuri sau țevi, înfășurarea de magnetizare se pune lateral, peste țevi sau nervuri.

De asemenea, pentru a obține o repartizare mai uniformă a temperaturii, spirele de magnetizare se înfășoară mai des pe partea de jos a cuvei. Date orientative privind alegerea înfășurării de magnetizare se dau în tabelul 5.8.

Schema de uscare a transformatorului în cuvă proprie este indicată în figura 5.3.

Pentru reducerea pierderilor de căldură se recomandă ca transformatorul, în timpul uscării, să fie introdus într-o cameră izolată termic.

Drept sursă de curent se poate folosi un transformator de sudură. Pentru evacuarea umezelii, partea decuvabilă a transformatorului se ventilează cu ajutorul ventilatorului folosind orificiile din capacul transformatorului sau orificiile de trecere ale izolatoarelor. Aerul cald intră în cuvă prin partea de

TABELUL 5.3

Date orientative pentru alegerea înfăşurării de magnetizare la uscarea transformatoarelor, în cuvă proprie, fără vid

Puterea transformatorului [kVA]	Perimetrul [m]	Temperatura mediului [°C]	Tensiunea de magnetizare: 65 V — Număr de spire	65 V — Curentul [A]	120 V — Număr de spire	120 V — Curentul [A]	220 V — Număr de spire	220 V — Curentul [A]
100	2,4	0	47/30	37/91	—	—	—	—
		15	52/36	31/74	—	—	—	—
		30	53/39	26/64	—	—	—	—
150	2,54	0	45/33	42/103	—	—	—	—
		15	49/34	35/88	—	—	—	—
		30	50/37	29/77	—	—	—	—
320	2,75	0	42/30	60/124	—	—	—	—
		15	44/32	42/106	—	—	—	—
		30	47/34	35/87	—	—	—	—
560	3,32	0	34/24	80/148	63/45	43/107	—	—
		15	35/26	68/168	67/47	37/91	—	—
		30	38/28	56/138	71/51	30/75	—	—
750	3,94	0	29/21	105/264	54/39	57/143	100/71	32/66
		15	31/22	89/224	57/42	48/121	105/76	28/56
		30	33/24	74/184	61/45	40/100	112/82	23/46
1 000	4,04	0	29/21	124/315	53/38	67/170	98/70	37/79
		15	30/22	107/265	56/41	58/144	103/75	31/66
		30	32/24	88/219	60/44	48/119	110/81	29/55

OBSERVAŢIE.

Valorile de la numărător se iau în cazul în care cuva este izolată termic cu azbest, iar cele de la numitor cînd cuva nu este izolată termic.

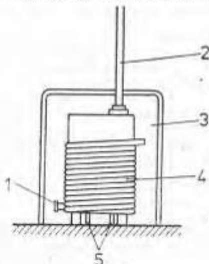


Figura 5.3. Schema de uscare a transformatorului în cuvă proprie: 1 — flanşa robinetului de scurgere a uleiului; 2 — ţeava de aerisire; 3 — cameră izolată termic; 4 — înfăşurare de magnetizare; 5 — încălzitor electric.

jos a acesteia și anume prin flanșa robinetului de scurgere al uleiului (aerul este încălzit în prealabil de încălzitoarele aflate sub cuva transformatorului). Se poate amenaja o ventilare naturală, prin instalarea pe capacul cuvei a unei țevi înaltă de 2—3 m.

Temperatura cuvei se va ridica treptat, astfel încît viteza de creștere a temperaturii să nu depășească 30—40°C/h. Temperatura aerului cald, din interiorul cuvei, se va menține la 100—105°C. Reglarea temperaturii se va face prin deconectări periodice de la sursă ale înfășurării de magnetizare. Pentru o uscare mai intensă se recomandă să se reducă periodic temperatura pînă la 50—60°C și să fie apoi mărită pînă la 100—105°C.

Se notează, din oră în oră, atît indicațiile termometrelor, cît și valorile curentului și tensiunii sursei de magnetizare.

La fiecare două ore se măsoară rezistența de izolație atît între înfășurări cît și față de masă.

Uscarea se consideră terminată, dacă valoarea rezistenței de izolație a înfășurărilor la temperatura stabilizată de 100—105°C, se menține constantă timp de 6—8 h (fig. 5.4).

După uscare, se revizuiește partea decuvabilă, se înlătură termocuplele și termorezistențele, se string îmbinările, după care partea decuvabilă se introduce în cuvă iar transformatorul se umple cu ulei curat.

b. *Uscarea prin tratarea uleiului în circuit închis.* Pentru aplicarea acestei metode se realizează o instalație (fig. 5.5) compusă din următoarele elemente:

— o instalație de tratare a uleiului, prevăzută cu un sistem de încălzire a acestuia pînă la 95°C și cu posibilitatea de realizare a unei presiuni reduse de $4 \cdot 10^3$ Pa. Capacitatea minimă a instalației va fi de 1 600 l/h;

— conductele aferente pentru racordarea instalației la robinetele transformatorului;

— elemente de măsură și control: un megohmetru de 10 000 MΩ la 2 500 V și o instalație de măsurat rigiditatea dielectrică a uleiului.

Uleiul se tratează în felul următor:

— se închide robinetul dintre releul Buchholz și conservator;

— se racordează transformatorul la instalația de tratare a uleiului 3, ca în figura 5.5. După racordare se deschid robinetele 1 și se pornește instalația;

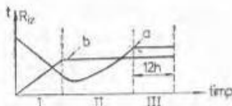


Figura 5.4. Variația rezistenței de izolație (a) și a temperaturii (b) în timp, la uscarea transformatoarelor.

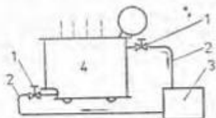


Figura 5.5. Racordarea instalației de tratare a uleiului de transformator: 1 — robinete; 2 — conducte de legătură; 3 — instalația de tratare a uleiului; 4 — transformatorul. Săgeata indică sensul de circulație a uleiului.

— se începe încălzirea uleiului, evaporarea sub vid și procesul de filtrare. Umezeala, pătrunsă eventual în transformator, este antrenată de ulei și este eliminată atît timp cît continuă procesul de uscare;

— se încălzește uleiul în continuare, pînă cînd temperatura în transformator se stabilizează, avînd însă grijă ca temperatura uleiului, măsurată în rezervorul instalației, să nu depășească 90°C;

— procesul de uscare se controlează măsurînd rezistența izolației înfășurărilor și ridicînd curba de variație a acesteia în timp. Alura curbei trebuie să fie ca în figura 5.4.

În prima perioadă în care tempratura crește, rezistența izolației scade (domeniul I), apoi în timp ce temperatura rămîne constantă, rezistența de izolație rămîne și ea constantă un timp, apoi crește pînă cînd atinge valoarea maximă (domeniul II). După un interval de circa 12 ore de la stabilizarea rezistenței de izolație la valoarea maximă (domeniul III), uscarea se consideră terminată.

Rigiditatea dielectrică a uleiului în transformator la terminarea procesului de uscare trebuie să fie de circa 200 kV/cm.

5.2. EXPLOATAREA ȘI ÎNTREȚINEREA TRANSFORMATOARELOR [1, 7]

5.2.1. EXPLOATAREA TRANSFORMATOARELOR

Pe durata exploatării, sarcina transformatoarelor variază atît în timpul unei zile, cît și în timpul anului. În scopul utilizării la maximum a capacității transformatoarelor, pot fi admise în funcționare anumite sarcini de valoare și durată predeterminată. Determinarea posibilității de supraîncărcare sistematică a unui trnasformator se poate face folosind două elemente:

— coeficientul de încărcare al graficului transformatorului pe un interval de 24 h;

— diagrama de încărcare a transformatorului.

Coeficientul de încărcare al graficului transformatorului S, este raportul dintre suprafața limitată de graficul de încărcare a transformatorului cu abscisa și suprafața dreptunghiului ale cărui laturi sînt: abscisa $T = 24$ h și ordonata I_{max} — curentul maxim din graficul de încărcare a transformatorului. Valoarea coeficientului de încărcare se determină deci cu relația

$$S = \frac{\Sigma I_i}{24 I_{max}}. \qquad (5.5)$$

Dacă $S < 1$, *coeficientul de încărcare admisibil* (numit și *coeficient de suprasarcină*) se poate stabili la valoarea $k = \frac{I_{adm}}{I_N}$ în funcție de durata supraîncărcării. Stabilirea supraîncărcării transformatorului în acest mod conduce la folosirea sa rațională din punct de vedere al duratei normale de serviciu, rămînînd în același timp și o oarecare rezervă pentru suprasarcini neprevă-

zute, în caz de avarii. Valoarea $k = f(t)$ a coeficientului de suprasarcină, se obține din diagrame, pentru diferite valori ale coeficientului de încărcare al graficului S și ale temperaturii medii a mediului ambiant t_a.

Astfel, pentru transformatoare instalate în aer liber în localități unde temperatura medie anuală a aerului nu depășește $+5°C$, valoarea coeficientului de încărcare admisibil $k = \frac{I_{max}}{I_N}$ se poate lua din diagrama reprezentată în figura 5.6.

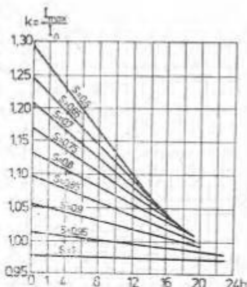


Figura 5.6. Diagrama $k = f$ (timp) pentru medii ambiante avînd temperatura medie anuală a aerului de $+5°C$.

În cazul în care transformatoarele sînt instalate în localități unde temperatura medie a aerului t_a este mai mare de $+5°C$, valorile admisibile pentru coeficientul de suprasarcină k trebuie să fie corelate prin înmulțirea cu un coeficient de corecție subunitar

$$A = 1 + \frac{5 - t_a}{100}. \qquad (5.6)$$

Pentru transformatoarele instalate în încăperi neîncălzite și ventilate se ia în considerare temperatura medie anuală a aerului t_a, majorată cu 8°C.

În cazul în care temperatura $t_a > 35°C$ (însă cel mult 45°C), sarcina transformatorului se reduce cu $(t_a - 35)\%$ față de sarcina nominală, indiferent de valoarea coeficientului S, din graficul de încărcare al transformatorului.

În mod curent, transformatoarele sînt încărcate mai mult iarna decît vara. Din această cauză, uzarea izolației în perioada de vară este mult mai redusă. Acest lucru permite să se mărească valoarea coeficientului de supraîncărcare $k = \frac{I_{max}}{I_N}$ în cursul lunilor de iarnă, peste valorile care se obțin din diagrama indicată (fig. 5.6). Cu alte cuvinte, dacă în perioada de vară sarcina maximă a transformatorului este cu $p\%$ mai mică decît cea nominală, în lunile de iarnă sarcina maximă poate să întreacă peste cea nominală, cu același $p\%$. Se recomandă însă ca $p\%$ să nu depășească 15% și să se țină seama de instrucțiunile fabricii constructoare.

În afara suprasarcinilor de durată cu care poate fi încărcat un transformator, există situații de avarii, care pot produce suprasarcini de valori mai mari, ce urmează să fie suportate de transformator. Întrucît astfel de suprasarcini provoacă o îmbătrînire prematură a izolației înfășurărilor transformatoarelor, ele sînt admise numai pentru durate scurte de timp.

Durata admisă de funcționare a transformatoarelor cu astfel de suprasarcini și valorile lor sînt menționate în tabelul 5.9.

TABELUL 5.9

Suprasarcini admise la transformatoare, în situații de avarii

Suprasarcină [%]	30	60	75	100	140
Durata, în [min]	120	30	15	7,5	3,5

După funcționarea în regim de suprasarcină, trebuie luate măsuri de reducere a încărcării transformatorului prin conectarea în paralel a altui transformator sau — în caz extrem — prin deconectarea unor consumatori de importanță mai redusă, pentru a preveni creșterea temperaturii peste limitele admise.

În exploatarea transformatoarelor, se disting două aspecte diferite:

— operațiile și manevrele în schema electrică, ce se execută prin punerea sau scoaterea din funcțiune a transformatoarelor și

— supravegherea funcționării transformatoarelor.

La punerea în funcțiune este necesar să se respecte o serie de prevederi, în scopul asigurării stării tehnice a transformatoarelor și protejării lor împotriva deteriorărilor (vezi paragraful 5.1).

Ordinea manevrelor la punerea și scoaterea din funcțiune a transformatorului ține seama de particularitățile schemei electrice în care este încadrat transformatorul. În general, trebuie respectate următoarele indicații:

— scoaterea de sub tensiune a unui transformator se face totdeauna prin deschiderea mai întîi a întrerupătorului și apoi a separatorului;

— în cazul transformatoarelor avînd joasa tensiune de maximum 0,4 kV între faze, partea de joasă tensiune se poate pune sub tensiune prin intermediul siguranțelor cu mîner;

— în cazul în care nu este prevăzut întrerupător în circuitul primar, transformatorul se poate pune sau scoate de sub tensiune prin manevrarea separatorului din primar, dar numai după ce s-au scos siguranțele sau s-a deschis întreruptorul din secundar, cu următoarele condiții:

a) la tensiuni peste 22 kV, separatoarele trebuie să fie trifazate, instalate în aer liber, iar manevrarea să se facă printr-un sistem mecanic (nu cu prăjina izolantă);

b) puterea transformatorului, în funcție de tensiunea primară, nu trebuie să depășească valorile indicate în tabelul 5.10;

TABELUL 5.10

Puterea maximă în funcție de tensiunea primară, în cazul transformatoarelor fără întreruptor în circuitul primar

Tensiunea [kV]	10	22	35	60	110
Puterea maximă [kVA]	320	560	1 000	1 600	3 200

— deconectarea transformatoarelor echipate cu întrerupătoare în ambele circuite (primar şi secundar), se face mai întîi pe partea sarcinii şi apoi pe partea alimentării, iar conectarea în ordine inversă.

În timpul funcţionării, în exploatare, a transformatoarelor se efectuează următoarele operaţii de supraveghere:

a) *Supravegherea curentă* asigurată prin personalul permanent de exploatare şi care se referă la:

— gradul de încărcare;

— tensiuni şi curenţi;

— sarcini active, reactive;

— frecvenţă;

— temperaturi;

— relee de protecţie şi semnalizare;

— citirea instrumentelor de măsură etc.

b) *Supravegheri periodice* prin examinare vizuală, la care se verifică:

— starea cuvelor şi a elementelor de circulaţie a uleiului;

— starea uleiului şi a nivelului;

— starea silicagelului din filtrul de aer;

— starea izolatoarelor, legăturilor la borne, zgomotelor etc.

De altfel, verificările amănunţite ce trebuie efectuate de către cei ce efectuează supravegherea transformatoarelor, la perioadele stabilite, sînt indicate mai jos.

c) Controale efectuate de personalul tehnic şi ingineresc.

d) Controale neperiodice.

Pentru supravegherea periodică, în condiţii de exploatare normală a transformatoarelor, sînt necesare următoarele periodicităţi:

— *pentru staţiile de transformare cu personal permanent*, de două ori pe schimb, respectiv la preluare şi la mijlocul schimbului;

— *pentru staţii cu personal de supraveghere la domiciliu*, de trei ori în 24 de ore astfel: un control la preluarea schimbului, unul la predare şi unul în cursul schimbului.

În cazurile de mai sus, unul din controalele din schimbul de noapte se va face cu iluminatul stins, pentru a se putea observa existenţa descărcărilor sau a contactelor slabe;

— *pentru staţii fără personal permanent*, un control pe lună, programat în perioada sarcinilor maxime. Cel puţin o dată la două luni controlul va fi efectuat pe timp de noapte;

— *pentru posturi de transformare*, un control pe an, care poate să se suprapună şi cu revizia postului în anul de programare a reviziei acestuia.

În funcţie de condiţiile particulare ale diferitelor staţii şi de natura consumatorilor se pot stabili şi alte periodicităţi.

La perioadele de timp menţionate, se vor controla transformatoarele de către personalul de exploatare, verificîndu-se următoarele:

— curentul primar şi curentul secundar;

— tensiunea primară şi tensiunea secundară;

— temperatura uleiului (buna funcţionare a termocopiei dacă transformatorul este prevăzut cu termocopie). Termocopia este un aparat care măsoară temperatura (sau supratemperatura), pe baza variaţiei rezistenţei cu temperatura;

— semnalizările releelor de protecție, inclusiv ale releului de gaze ;
— etanșeitatea cuvei ;
— temperatura mediului ambiant la transformatoarele din încăperi ;
— nivelul și culoarea uleiului din transformator și izolatoarele de trecere ;
— starea izolatoarelor (murdărie, fisuri, conturnări) ;
— integritatea membranei tubului de expandare a gazelor ;
— starea aparatului pentru deshidratat aerul și starea substanței din aparat (ionosil sau silicagel) ;
— starea descărcătoarelor de supratensiuni ;
— starea membranei la conservator (indicatorul de control al stării membranei elastice) ;
— nivelul de apă în cuva de colectare a uleiului pentru transformatoarele instalate în exterior ;
— zgomotul transformatorului (dacă nu este cumva anormal) ;
— legătura la priza de pămînt ;
— starea de funcționare normală a sistemului de răcire ;
— starea barelor și a cablurilor de legătură ;
— starea elementelor construcției (fundație, uși, geamuri, iluminare, ventilație, starea părții de construcție la posturile de transformare aeriene) ;
— starea tuturor legăturilor electrice aferente transformatorului ;
— starea tuturor accesoriilor și a aparatelor indicatoare ;
— starea dispozitivelor de blocare antiseismică ;
— starea îngrădirilor și a inscripționărilor.

Personalul de exploatare urmărește de asemenea executarea în termen, atît a tuturor probelor și verificărilor în exploatare prevăzute de normative, cît și a tuturor lucrărilor de întreținere a transformatoarelor și instalațiilor aferente.

5.2.2. ÎNTREȚINEREA TRANSFORMATOARELOR

Absența organelor în mișcare face ca lucrările de întreținere curentă să fie mult mai reduse și mai simple la transformatoare, decît la mașinile electrice rotative.

În general, aceste lucrări se execută la intervale de timp de 6 luni pînă la 1 an, în funcție de importanța transformatoarelor în exploatare și constau din :

— revizia exterioară a transformatorului și înlăturarea defectelor constatate, în măsura în care aceste remedieri pot fi făcute pe loc. Pentru defectele și regimurile anormale de lucru ale transformatoarelor a se vedea capitolul 6 ;

— evacuarea reziduului uleiului din conservator, verificarea nivelului și eventual completarea cu ulei ;

— verificarea etanșeității robinetelor și a strîngerii garniturilor cuvei ;

— revizia și curățarea sistemului de răcire forțată ;

— verificarea funcționării releului de gaze ;

— verificarea filtrului de aer, a nivelului uleiului în filtru și a stării silicagelului, cu eventuala completare, respectiv înlocuire a acestora ;

— controlul curent al uleiului din cuvă;
— determinarea gradului de umiditate al izolației înfășurărilor;
— măsurarea $tg\delta$ și a capacității bornelor de trecere de tip condensator.

5.2.3. CURĂȚAREA ȘI REGENERAREA UEIULUI

Deosebit de important pentru funcționarea în condiții bune a transformatoarelor este ca uleiul să-și mențină calitățile, un timp cît mai îndelungat. Dar, în timpul exploatării uleiul din transformator își înrăutățește caracteristicile ca urmare a anumitor agenți cum ar fi umiditatea, conținutul de carbon, aciditatea sau oxidarea etc.

Uleiul mineral absoarbe apa, ceea ce duce la scăderea calităților izolante ale lui; cu creșterea procentului de umiditate relativă a aerului, crește și conținutul de apă în ulei. Uleiul și apa absorbită rămîn în stare de soluție. Nu se produce însă schimbarea aspectului uleiului și, de asemenea, apa nu se decantează, chiar după o perioadă lungă de decantare. Dacă însă cantitatea de apă din ulei depășește limita de saturație la temperatura respectivă, excedentul de apă trece în formă de suspensie care provoacă o tulburare a uleiului.

Dacă uleiul este în contact cu aerul, atunci între cele două medii se stabilește un echilibru și anume gradul de umiditate relativă a aerului și gradul de umiditate relativă a uleiului tind spre aceeași valoare, care la diferite temperaturi pot depăși gradul de saturație și trec în formă de apă în ulei, apă care se precipită la baza cuvei. Prin urmare se poate spune să se produce o *respirație a transformatorului.*

De asemenea, uleiul de transformator are tendința de a absorbi gaze. Volumul de aer dizolvat de ulei este influențat mult de presiune și mai puțin de temperatură. La presiunea atmosferică normală, cantitatea de aer din ulei este de 10% din volum, cunoscînd că uleiul are o mai mare afinitate pentru oxigen decît pentru azotul din aer.

Dacă transformatorul este de tip etanș, atunci cînd temperatura scade, volumul de ulei scade mult și crește procentul de aer pe care îl conține. Cînd uleiul devine suprasaturat cu aer, cum se întîmplă cînd presiunea scade brusc, atunci în ulei se formează bule de aer, care reduc mult rigiditatea dielectrică a uleiului.

Gazul cel mai nefavorabil pentru ulei este oxigenul, deoarece produce îmbătrînirea uleiului prin *oxidare*. De aceea, cum s-a menționat și la paragraful 5.1.4. A, în uleiul de transformator se introduc substanțe chimice denumite *inhibitori*, al căror rol este protejarea uleiului contra oxidării.

În fine, în ulei pot exista impurități solide și nămoluri. Impuritățile apar accidental în cuve și radiatoare și sînt în special fibre de celuloză care micșorează rigiditatea dielectrică a uleiului.

Nămolurile sînt produse de transformări interne ale uleiului, și anume oxidarea și dizolvarea în ulei a diferitelor materiale cufundate în el. Efectul impurităților asupra proprietăților uleiului este aceiași ca și umiditatea și gazele absorbite și anume înrăutățirea caracteristicilor electrice ale uleiului.

O problemă deosebită a exploatării transformatoarelor o constituie faptul că în timp, datorită acțiunii acestor factori, uleiul își pierde calitățile izolante și trebuie scos din funcțiune. De asemenea, majoritatea defecțiunilor de natură

electrică şi mecanică se răsfring şi asupra calităţii uleiului. De aceea, pentru a asigura funcţionarea transformatorului în condiţii normale se impune verificarea periodică a uleiului din transformator.

Literatura de specialitate recomandă verificarea obligatorie a uleiului în următoarele intervale de timp: înainte de punerea în funcţiune, după trei luni de la punerea în funcţiune şi apoi din şase în şase luni. În funcţie de condiţiile de exploatare, verificarea uleiului este stabilită prin normele de exploatare a transformatoarelor. De asemenea, în cazuri de avarii suferite de transformator se impune verificarea uleiului.

Probele de ulei se colectează la buşoanele prevăzute în acest scop. În prealabil, buşoanele vor fi curăţate iar vasele de luat probe vor fi spălate, uscate şi clătite de 2...3 ori în uleiul de probat. Proba se va lua după ce s-a lăsat să se scurgă liber circa 2 litri de ulei. Vasele cu uleiul pentru probă se vor astupa imediat, de preferinţă cu un dop de sticlă, de plută sau de plastic, nu cu unul de cauciuc sau hîrtie.

Probele transportate pe timp rece nu se vor destupa decît după ce uleiul a luat temperatura camerei, pentru a preveni condensarea în ulei a umezelii din aer.

Condiţiile pe care trebuie să le îndeplinească uleiul de transformator conform STAS 811-83 sînt date în tabelul 5.11.

TABELUL 5.11

Proprietăţile fizice şi chimice ale uleiului de transformator

Caracteristici	Condiţii de admisibilitate	Metode de analiză
Aspect	clar, limpede	Vizual
Densitate la 20°C, kg/dm^3, max.	0,89	STAS 35-81
Viscozitate cinematică, mm^{2}s^{-1} (cSt):		
— la +20°C, cSt, max	30	STAS 117-66
— la +50°C, cSt, max	10	
— la −15°C, cSt, max	800	
Punct de inflamabilitate PM, °C, min	140	STAS 5488-80
Punct de congelare, °C, max	−40	STAS 39-80
Aciditate minerală şi alcalinitate	lipsă	STAS 22-64
Indice de neutralizare, mg KOH/g, max	0,03	STAS 23-75
Coroziune pe lama de cupru, max	1 b	STAS 40-73
Sulf coroziv pe lama de argint	absent	STAS 11096-81
Tensiune interfacială faţă de apă, 10^{-3} N/m, min	40	STAS 9654-74
Punct de anilină, °C, min	70	STAS 178-74
Substanţe insolubile în solvenţi organici	lipsă	STAS 33-78
Rigiditate dielectrică, kV/cm, min:		
— ulei netratat	120	STAS 286-81
— ulei tratat	210	
Tangenta unghiului de pierderi dielectrice la 90°C, max	$4\cdot10^{-3}$	STAS 6799-81
Stabilitatea la oxidare:		
— indice de neutralizare, mg KOH/g, max.	0,30	STAS 6798-63
— gudroane, ‰ max.	0,1	idem
— tangenta unghiului de pierderi dielectrice la 90°C, max.	$130\cdot10^{-3}$	STAS 6799-81

În funcție de necesități, încercarea uleiului poate include un număr diferit de determinări, deosebind din acest punct de vedere trei tipuri de încercări:
— controlul curent;
— analiza redusă;
— analiza completă.

Controlul curent constă în următoarele determinări: rigiditatea dielectrică, tangenta unghiului de pierderi dielectrice, aspectul, mirosul și conținutul de apă.

Analiza redusă pe lingă determinările prevăzute de controlul curent, include și: culoarea, punctul de inflamabilitate, viscozitatea, indicele de neutralizare, prezența apei, impuritățile mecanice, cărbune în suspensie și punctul de congelare.

Analiza completă include toate probele necesare, care să ateste calitatea uleiului conform tabelului 5.11.

Un prim factor care provoacă pierderea calităților izolante îl constituie *pătrunderea a diferite substanțe* în ulei, fără ca el să sufere vreo schimbare radicală. Tratarea uleiului în această situație se efectuează prin metode mecanice de curățare, principalele metode fiind: decantarea, centrifugarea, filtrarea și spălarea. Prin aceste metode se îndepărtează apa, nămolul insolubil, cărbunele și alte impurități din ulei.

Al doilea factor care determină scoaterea uleiului din funcțiune este *oxidarea*, care schimbă radical calitățile sale și face necesară folosirea unor metode chimice de regenerare, dintre care se menționează: metoda cu acid sulfuric, metoda cu alcalii și pămînt decolorant și tratarea cu absorbanți.

După o tratare corect executată, uleiul trebuie să-și recapete calitățile inițiale și să corespundă normelor de calitate în vigoare.

A. **Curățarea uleiului.**

a. *Decantarea* constă în lăsarea uleiului un timp mai îndelungat într-un vas nemișcat. Aceasta duce la separarea uleiului de celelalte substanțe (apa și impuritățile mecanice), care au masa specifică mai mare și se depun la fundul vasului. Decantarea se face în condiții optime la temperatura de 30—40°C. Datorită simplității și utilajului redus, metoda este indicată la tratarea uleiurilor în cadrul gospodăriilor de ulei.

Decantarea se face în rezervoare de ulei prevăzute cu posibilitatea de evacuare a nămolului și impurităților. Metoda are dezavantajul că necesită un timp îndelungat și nu este total eficace.

b. *Centrifugarea* este o metodă mai rapidă și mai eficace de curățare a uleiului. Datorită forței centrifuge, particulele solide, mai grele decît uleiul, sînt aruncate spre pereții vasului, iar lichidul se separă în straturi, în ordinea masei specifice a componentelor, respectiv apa spre exterior și uleiul spre interior (fig. 5.7).

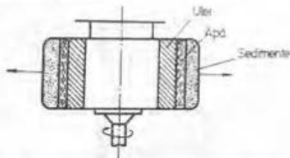


Figura 5.7. Curățarea uleiului prin centrifugare.

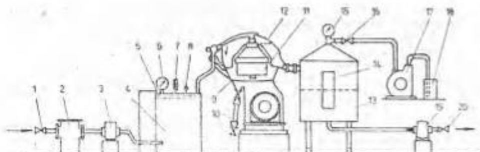


Figura 5.8. Instalaţie complexă de tratare a uleiului de transformator prin centrifugare: 1 — ventil de intrare; 2 — filtru; 3 — pompă; 4 — recipient de încălzire a uleiului; 5 — rezistenţă electrică de încălzire; 6 — manometru; 7 — termometru; 8 — ventil de siguranţă; 9 — centrifugă cu vid; 10 — conductă de evacuare a impurităţilor; 11 — tamburul centrifugei; 12 — ulei pulverizat; 13 — incintă vidată; 14 — vizor; 15 — vacuummetru; 16 — ventil; 17 — pompă de vid; 18 — vas de condensare; 19 — pompă; 20 — ventil de ieşire.

În figura 5.8 este reprezentată o instalaţie de centrifugare a uleiului în care, după o filtrare grosieră, uleiul se încălzeşte, se centrifughează şi se usucă în vid. Metoda are dezavantajul predispunerii uleiului la oxidare, centrifugarea repetată contribuind la îmbătrînirea prematură a uleiului.

c. *Uscarea sub vid* este o metodă mai perfecţionată pentru îndepărtarea apei, la care viteza de evaporare completă a apei depinde de două elemente principale:

— diferenţa dintre presiunea aerului saturat cu vapori, la temperatura dată şi presiunea permanentă din recipientul instalaţiei;

— gradul de pulverizare a uleiului.

O pulverizare corectă, la un vid de 90% şi la temperatura de 45°C, conduce practic la uscarea totală a uleiului fără nici un fel de oxidare, datorită rapidităţii uscării.

Schema uscării uleiului prin pulverizare este reprezentată în figura 5.9.

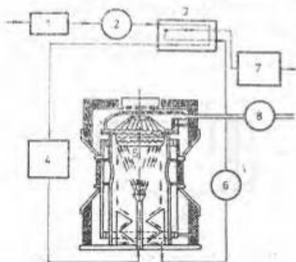


Figura 5.9. Schema uscării uleiului prin pulverizare în vacuum.

După o primă curăţare, cu ajutorul unei centrifuge 1, uleiul este introdus în circuit cu pompa 2. Adus la temperatura de 45°C în schimbătorul de căldură 3 şi în încălzitorul 4, uleiul este pulverizat în recipientul 5, de unde, cu ajutorul pompei 6, este trecut prin schimbătorul de căldură 3 şi filtrul-presă 7.

La trecerea uleiului printr-un mediu poros (hîrtie, carton, diverse ţesături) impurităţile, inclusiv apa, sînt reţinute. Vidul în recipientul 5 se realizează cu ajutorul pompei de vacuum 8.

Observaţie: Avînd în vedere complexitatea instalaţiilor de uscare prin vid, curăţarea uleiului poate fi realizată, în condiţii destul de bune, prin completarea instalaţiei de centrifugare a uleiului cu o instalaţie de filtrare.

Asemenea instalaţii funcţionează în general la o presiune a uleiului de 4—5 atm, eficacitatea filtrării fiind maximă la temperatura uleiului de 40—45°C.

B. **Regenerarea uleiului.**

Cea de-a doua cauză a alterării proprietăţilor electroizolante ale uleiului, *oxidarea sau îmbătrînirea* afectează numai o mică parte (3—5%) din hidrocarburile principale din compoziţia acestuia, cealaltă parte rămînînd neschimbată din punct de vedere calitativ. Regenerarea uleiului constă în separarea şi înlăturarea produselor de descompunere respective, astfel încît — dacă metoda este aleasă corect — uleiul regenerat redobîndeşte caracteristicile uleiului nou.

a. *Tratarea cu acid, alcalii şi pămînt decolorant* este una din metodele cele mai eficace, care permite restabilirea tuturor proprietăţilor uleiului.

Un exemplu de instalaţie de tratare după această metodă este dat în figura 5.10. Uleiul din rezervorul 1 este pompat prin filtrul 2 în amestecătorul 3, unde este tratat timp de 1 h cu acid sulfuric (concentraţie 95%), introdus din rezervorul 4. Tratarea se face prin barbotare cu aer comprimat, care se usucă la trecerea lui prin recipienţii 5 (cu cocs) şi 6 (cu var).

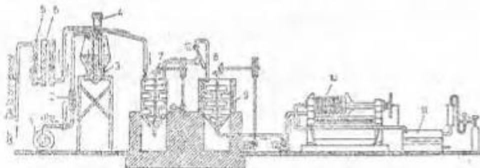


Figura 5.10. Instalaţie de regenerare a uleiului după metoda acid sulfuric — alcalii — pămînt decolorant: 1 — rezervor de ulei; 2 — filtru; 3 — amestecător; 4 — rezervor dozator de acid sulfuric; 5 — filtru de cocs; 6 — filtru cu var; 7 — recipient de tratare cu alcalii; 8 — agitator pentru amestec cu pămînt decolorant; 9 — manta cu aburi; 10 — filtru-presă; 11 — rezervor pentru ulei curat; 12, 13 — pompe.

Acidul sulfuric, adăugat în proporție de (0,5—1)%, reacționează cu compușii nestabili, transformîndu-i în gudroane acide, care se îndepărtează după decantare. În recipientul 7, uleiul este alcalinizat pentru neutralizarea resturilor de acid sulfuric și acizi organici și pentru saponificarea esterilor și altor substanțe neatacate de acidul sulfuric. Alcalinizarea se execută cu hidroxid de sodiu (sau alte substanțe) prin amestecare.

După o nouă decantare, uleiul este spălat cu apă distilată, încălzit la 90°C și uscat prin insuflare de aer uscat.

Tratarea cu pămînt decolorant în agitatorul 8 are ca scop îndepărtarea completă a urmelor de acizi și alcalii.

b. *Tratarea cu absorbanți* este o metodă mai rapidă, care constă în:

— amestecarea uleiului cu materialul absorbant măcinat foarte fin (metoda de contact);

— filtrarea prin materialul absorbant (metoda filtrării sau precolonării).

Ca material absorbant se poate folosi un amestec de silicagel și alumină activată. Pe lîngă instalațiile de regenerare fixe, descrise mai sus, se pot folosi instalații mobile, cu ajutorul cărora se poate regenera uleiul transformatoarelor în funcțiune sau uleiurile uzate din marile stații de transformare.

Capitolul 6

DEFECTELE FRECVENTE ȘI REGIMURILE ANORMALE DE FUNCȚIONARE ALE TRANSFORMATOARELOR ELECTRICE. CAUZELE ȘI REMEDIEREA LOR

6.1. GENERALITĂȚI

Cum reiese din cele menționate în capitolele anterioare, transformatorul este un element al instalațiilor de alimentare cu energie electrică a consumatorilor, care face legătura între producătorii de energie electrică și rețeaua de transport a acesteia sau între rețeaua de transport și consumatorii de energie electrică. El are rolul de a realiza transformarea valorilor unor mărimi ale energiei electrice (tensiune și curent) la valorile necesare pentru transport sau pentru consumatori, după caz.

După cum se știe, în funcție de poziția pe care o ocupă un transformator în rețeaua electrică, acesta poate fi :

— *ridicător de tensiune*, dacă se află conectat între producător și rețeaua de transport. Acestea sînt, de obicei, unități de putere mare, de ordinul sutelor de MVA ;

— *coborîtor de tensiune*, dacă se află conectat între rețeaua de transport și consumator. În acest caz, puterea transformatoarelor este foarte diversă, după necesitate.

În acest capitol se tratează numai defectele transformatoarelor de putere, în ulei, a căror utilizare a căpătat o extindere aproape generală. Transformatoarele uscate, în aer, și cele cu nisip, sînt construcții speciale ; defecțiunile și regimurile anormale ale lor sînt aceleași ca și ale transformatoarelor în ulei, mai puțin cele legate de întreținerea uleiului. Aceste transformatoare, însă, nu se realizează în unități mari și au o extindere restrînsă.

6.2. DEFECTELE ȘI REGIMURILE ANORMALE DE FUNCȚIONALE ALE TRANSFORMATOARELOR [1, 7]

6.2.1. SUPRAÎNCĂLZIREA TRANSFORMATORULUI

În cele ce urmează, se vor expune principalele situații în care pot apărea supraîncălziri ale transformatoarelor.

A. **Transformatorul este supraîncărcat.** Avîndu-se în vedere că, în mod obișnuit, un transformator poate să funcționeze cu o suprasarcină limitată de condițiile de funcționare și de mediul ambiant, determinarea faptului că un transformator este sau nu un supraîncărcat se face din diagrama de sarcină, întocmită în baza citirilor indicației ampermetrelor, pentru o perioadă de 24 h (vezi paragraful 5.2.1).

În funcție de graficul de sarcină pe o perioadă limitată, orice transformator admite o suprasarcină.

În cazuri excepționale, se admite o supraîncărcare de avarie a transformatorului, fără a ține cont de temperatura mediului ambiant sau de sarcina anterioară a transformatorului, cu condiția însă de a nu depăși temperaturile admisibile ale înfășurărilor sau uleiului.

Cînd transformatoarele trebuie să lucreze în regim de suprasarcină, în special în cazul avariilor, durata funcționării și suprasarcina nu vor depăși valorile prescrise în tabelul 5.9.

B. Temperatura din încăperea transformatoarelor este prea ridicată. Se măsoară temperatura aerului în camera în care este montat transformatorul la distanța de circa 2 m de cuva acestuia și la jumătatea înălțimii ei. Dacă temperatura măsurată depășește cu 8—10°C temperatura admisă, se vor lua măsuri de intensificare a ventilației camerei de lucru a transformatorului.

Pentru ventilarea camerelor în care sînt montate transformatoare cu puteri de peste 1 000 kVA, se folosesc orificii de ventilație în partea inferioară pentru introducerea aerului rece și în partea superioară pentru evacuarea aerului cald.

Orificiile de intrare și ieșire a aerului se închid cu jaluzele, pentru a evita pătrunderea apei de ploaie sau a păsărilor.

Ventilația încăperilor în care funcționează transformatoare se calculează astfel încît diferența de temperatură dintre aerul la intrare și aerul de la ieșire să nu fie mai mare de 15 °C.

C. Nivelul uleiului în transformator este foarte scăzut. Acest lucru poate apărea la transformatoarele care funcționează fără supraveghere, timp îndelungat. Partea neacoperită de ulei a miezului magnetic și a înfășurărilor se va încălzi excesiv, din cauza lipsei agentului de răcire. După ce se stabilește unde au loc pierderile de ulei, se completează uleiul, pînă la nivelul normal, cu ulei de calitate corespunzătoare.

D. Defectele interioare ale transformatorului care provoacă încălzirea uleiului. Astfel de defecțiuni pot fi:

— *deteriorarea izolației buloanelor de strîngere a miezului magnetic al transformatorului*, care duce la realizarea unor scurtcircuite între tole și pierderi mari în fier;

— *deteriorarea izolației consolelor care strîng jugul magnetic*;

— *deteriorarea izolației pieselor de asamblare a coloanelor.*

Toate aceste scurtcircuitări, de obicei, nu produc încălziri puternice, decît în cazul unor accentuări ale defecțiunilor, caz în care crește rapid temperatura uleiului. Pentru remediere, se repară izolația deteriorată.

E. Rapoarturi de transformare diferite la transformatoare care funcționează în paralel. Acest lucru duce la apariția unui curent de egalizare între transformatoare. Repartizarea sarcinii va fi neuniformă, transformatorul care are tensiunea secundară mai mare, în gol, se va încărca mai mult.

Pentru remediere, se va înlocui unul din transformatoare cu un transformator care să îndeplinească, împreună cu celălalt transformator, toate condițiile de cuplare și funcționare în paralel (vezi paragraful 2.2.4).

F. **Transformatoarele cu tensiuni de scurtcircuit diferite (în cazul funcționării în paralel).** În această situație, repartizarea sarcinii între transformatoare se face proporțional cu puterea nominală și invers proporțional cu tensiunea de scurtcircuit. Dacă transformatorul mai mic are tensiunea de scurtcircuit mai mică, va prelua o încărcare mai mare și va împiedica încărcarea transformatorului mai mare la sarcina nominală. Pentru a elimina astfel de cazuri, la punerea în paralel a transformatoarelor, se vor respecta următoarele condiții:

— *transformatoarele vor avea rapoartele de transformare egale (abatere admisă ± 0,5%)*;

— *transformatoarele vor avea tensiunile de scurtcircuit egale (abatere admisă ± 10%)*;

— *transformatoarele trebuie să aibă aceeași grupă de conexiuni (fără abatere)*;

— *raportul puterilor nominale nu va fi mai mare de 3 : 1.*

Conectarea în paralel a transformatoarelor după reparații, se va face numai după identificarea fazelor și a grupei de conexiuni.

6.2.2. BÎZÎIT ANORMAL ÎN TRANSFORMATOR

Bîzîitul anormal în funcționarea unui transformator se manifestă în următoarele cazuri:

— *s-a slăbit strîngerea tolelor miezului.* Pentru remediere, se demontează transformatorul (se decuvează) și se string buloanele de presare ale miezului;

— *s-a slăbit strîngerea pachetelor de tole*, la transformatoarele cu miezul țesut. Din cauza vibrației miezului magnetic, s-a slăbit strîngerea tiranților verticali care leagă jugul superior cu jugul inferior, a crescut astfel întrefierul de îmbinare, intensificîndu-se bîzîitul transformatorului. Se va strînge miezul (după ce se schimbă garniturile izolante ale jugului superior și inferior) și tiranții;

— *vibrează tolele de capăt ale miezului.* Se vor împăna tolele cu preșpan;

— *s-au slăbit șuruburile care fixează capacul transformatorului sau alte detalii.* Se verifică strîngerea tuturor șuruburilor;

— *transformatorul este supraîncărcat*, sau există un dezechilibru mare între încărcarea fazelor. Se reduce sarcina transformatorului sau se reduce asimetria sarcinii. Defecțiunea este caracteristică la transformatoarele care alimentează instalații de iluminat;

— *scurtcircuite între faze sau între spire.* În această situație, pe lîngă zgomot defecțiunea se manifestă și prin curent mare absorbit, deci prin încălzire (de obicei transformatorul este deconectat de protecție sau se ard siguranțele fuzibile). Se repară înfășurarea la locul defecțiunii;

— *transformatorul funcționează cu tensiune ridicată.* Situația aceasta se întîlnește în special în zilele de repaus, cînd crește tensiunea rețelei, nefiind consumatori. Se pune comutatorul de tensiune al transformatorului pe poziție de tensiune maximă (dacă este coborîtor de tensiune, deoarece comutatorul se află, de obicei, pe înfășurarea de înaltă tensiune) și se deconectează condensatoarele statice, dacă acestea există.

6.2.3. TROSNITURI ÎN INTERIORUL TRANSFORMATORULUI

Manifestarea prin trosnituri a defecţiunilor unui transformator se produce în următoarele cazuri:

— *a avut loc o conturnare* (străpungere pe suprafaţă). Datorită supratensiunilor de moment, între capetele de ieşire şi cuvă se pot produce conturnări de scurtă durată, fără distrugerea izolaţiei. Se verifică şi se repară izolaţia capetelor de ieşire ale înfăşurării, la locul conturnării;

— *s-a întrerupt legătura cu pămîntul*. Oţelul masiv şi alte piese ale circuitului feromagnetic al transformatorului se leagă la pămînt prin capacul transformatorului şi cuvă. În felul acesta, sarcinile electrice care apar în timpul funcţionării transformatorului în aceste piese se scurg la pămînt (înfăşurările şi părţile metalice ale transformatorului se comportă ca un condensator). În cazul întreruperii legăturii la pămînt, pot apărea descărcări între înfăşurări sau capetele de ieşire şi cuvă, descărcări care produc zgomote sub formă de trosnituri în interiorul tranformatorului.

Se va reface legătura la pămînt, aşa cum a fost iniţial executată de uzina constructoare a transformatorului; conductorul de legare la pămînt se leagă pe aceeaşi parte, în aceleaşi puncte ale transformatorului. Legătura la pămînt, efectuată necorespunzător, poate produce scurtcircuite.

6.2.4. STRĂPUNGERILE ŞI ÎNTRERUPERILE ÎNFĂŞURĂRILOR TRANSFORMATOARELOR

A. **Străpungerile între înfăşurări şi cuvă, între înfăşurările de înaltă şi de joasă tensiune sau între faze.** Asemenea defecte se produc, de obicei, în următoarele cazuri:

— *au apărut supratensiuni* ca urmare a descărcărilor atmosferice, a avariilor sau a proceselor tranzitorii;

— *a scăzut mult calitatea uleiului* (umezire, impurificare etc.);

— *izolaţia este îmbătrînită* (adică şi-a pierdut din calităţi) ca urmare a supraîncălzirilor, a scurtcircuitelor sau a degradării în timp;

— *datorită efectelor forţelor electrodinamice* apărute ca urmare a unor scurtcircuite exterioare transformatorului.

În literatura de specialitate se arată că în cazul supratensiunilor pot să aibă loc nu numai străpungeri ale izolaţiei, ci şi conturnări între înfăşurări, între faze sau între înfăşurări şi cuve. Ca rezultat al conturnării se deteriorează izolaţia cîtorva spire, care se pot topi local, însă lipseşte ca atare legătura metalică între spire, faze, sau între înfăşurări şi cuvă.

Străpungerea izolaţiei înfăşurărilor se poate descoperi cu megohmmetrul. În unele cazuri, cînd apar locuri neizolate (datorită supratensiunii) pe înfăşurări, sub forma unor descărcări punctiforme, se poate descoperi defectul numai încercînd transformatorul sub tensiune (aplicată sau indusă).

Se repară, sau, la nevoie, se schimbă înfăşurările.

B. **Întreruperi în înfăşurări.** Ca rezultat al unor contacte imperfecte, se topeşte o porţiune din conductorul înfăşurării, sau din conductoarele de ieşire din înfăşurări. Defectul se descoperă datorită degajării de gaze sub efectul

termic al arcului electric, gaze care determină deconectarea, de către releul de gaze, a transformatorului.

Cauzele care pot duce la această defecțiune pot fi:

— *lipirea unor legături ale înfășurărilor executată incorect;*

— *defecțiuni ale conductoarelor care leagă capetele înfășurării cu bornele;*

— *ruperea unor conductoare datorită eforturilor electrodinamice din timpul scurtcircuitelor.*

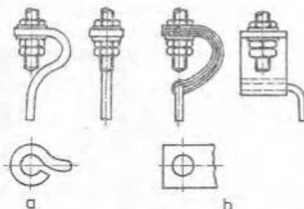


Figura 6.1. Conectarea capetelor de ieșire ale înfășurărilor la borne: a — cu conductor rotund; b — cu benzi de cupru.

Întreruperile se pot constata cu ajutorul unui ohmmetru. Locul întreruperii se poate stabili fie vizual, fie cu ajutorul ohmmetrului, controlînd înfășurarea pe porțiuni. De obicei, întreruperea are loc la locul de îndoire a conductorului sub piulița bornei (fig. 6.1). Se repară înfășurarea. Pentru a preîntîmpina astfel de defecțiuni, se înlocuiește conductorul rotund cu o legătură elastică, care constă dintr-un pachet de benzi de cupru, a cărui secțiune este egală cu secțiunea conductorului (fig. 6.1 b).

6.2.5. FUNCȚIONAREA PROTECȚIEI PRIN RELEUL DE GAZE (BUCHHOLZ)

Protecția prin releul de gaze este o protecție sensibilă la defectele interioare sau la funcționarea anormală a transformatorului, în cazul în care aceasta este însoțită de degajări de gaze. În funcție de intensitatea degajării de gaze, releul Buchholz semnalizează prezența degajărilor de gaze sau scoate de sub tensiune transformatorul, intervenind în circuitul de comandă al întreruptorului acestuia.

Releul de gaze (fig. 6.2) se montează pe conducta de legătură dintre conservatorul de ulei și cuva transformatorului. El este parcurs de întreaga cantitate de gaze ce se produce în interiorul cuvei. În stare normală, releul este în întregime plin cu ulei.

Dacă apare o degajare lentă de gaze, acestea se adună în partea superioară a releului, coborînd nivelul de ulei. Plutitorul superior A (fig. 6.2) închide contactele de semnalizare, avertizînd personalul de exploatare.

La degajări intense de gaze, acestea acționează direct asupra plutitorului B, care închide contactele din circuitul de comandă al întreruptorului, provocînd scoaterea de sub tensiune a transformatorului.

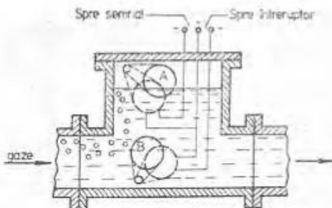


Figura 6.2. Releu de gaze (Buchholz).

Degajările de gaze, deci și funcționarea releului Buchholz, au loc în următoarele situații :

— *în interiorul transformatorului au apărut defecte mici, care duc la degajări slabe de gaze ;*

— *în timpul umplerii transformatorului cu ulei, a rămas aer în transformator ;*

— *nivelul uleiului este scăzut din cauza scăderii temperaturii sau datorită pierderilor de ulei.*

În cazurile enumerate mai sus, releul de gaze acționează de obicei asupra contactelor de semnalizare. În alte situații (enumerate în continuare), releul acționează asupra comenzilor de deconectare a transformatorului și anume cînd :

— *s-a produs scurtcircuit între spire ;*

— *s-a produs scurtcircuit între secundar și primar ;*

— *s-a produs scurtcircuit între faze ;*

— *s-a produs conturnarea sau străpungerea izolației comutatorului de tensiuni.*

Scurtcircuitul poate apărea ca urmare a izolării insuficiente a legăturilor de trecere, deteriorării izolației spirelor de presare, bavurilor de pe spira de cupru, deteriorării mecanice sau naturale a izolației sau a scăderii nivelului de ulei.

Prin spirele scurtcircuitate circulă un curent de valoare foarte mare, în timp ce curentul pe fază poate să crească puțin ; izolația spirelor se arde și chiar se topesc conductoarele, rezultînd degajări de gaze ; dacă avaria ia proporții, poate apărea scurtcircuitul între faze.

În cazul unui număr mare de spire în scurtcircuit, uleiul se încălzește intens și poate chiar fierbe, într-un interval de timp scurt. În lipsa releului de gaze, aruncarea uleiului și fumului poate avea loc prin supape de siguranță. La scurtcircuite intense, cuva transformatorului poate chiar să explodeze sub presiunea gazelor.

Scurtcircuitul între spire se caracterizează prin încălzirea uleiului, creșterea curentului de alimentare a transformatorului și scăderea rezistenței active a fazei în care se produce scurtcircuitul.

Scurtcircuitul între faze evoluează, de obicei, rapid și este însoțit de arc electric; se manifestă prin degajări intense de gaze și aruncarea uleiului prin conservator sau supapele de siguranță. Aceleași manifestări se produc și în cazul scurtcircuitului dintre primar și secundar. În ambele situații au loc creșteri importante ale curentului de alimentare.

— Degajări masive de gaze pot avea loc și în cazul *deteriorării izolației buloanelor de strîngere* a miezului transformatorului; în acest caz, se încing piesele incluse în circuitul curenților turbionari induși, provocînd degajarea de gaze din ulei; se pot distruge buloanele și tolele alăturate acestora. Creșterea curentului de alimentare este însă insesizabilă.

— *Atingerea plăcilor de strîngere* a jugului cu cele de strîngere a coloanelor, la miezurile de oțel realizate prin țesere cu întrepătrundere, poate duce la încălzirea plăcilor și degajări puternice de gaze.

— *Existența unor scurtcircuite între tolele miezului* datorită deteriorării izolației între tole sau îmbătrînirii izolației duce, de asemenea, la apariția unor curenți turbionari intenși și la încălzirea puternică locală a miezului de oțel. Ca urmare, poate avea loc chiar distrugerea locală a miezului feromagnetic, rezultînd degajări de gaze.

— *Scăderea nivelului de ulei sau degajarea aerului din ulei*, ca urmare a răcirii bruște sau în urma reparațiilor curente (schimbarea uleiului), pot, de asemenea, produce acționarea releului de gaze.

Trebuie remarcat că, în practică, se observă adesea cazuri de semnalizări incorecte a protecției prin releul de gaze, din cauza defecțiunilor din circuitele secundare.

Avînd în vedere diversitatea situațiilor în care poate să acționeze releul de gaze, este necesar ca înainte de a porni la înlăturarea defectului să se stabilească precis care a fost cauza funcționării releului. Se stabilește cu precizie care din protecții a lucrat și se analizează gazele colectate în releul Buchholz (inflamabilitatea, culoarea, cantitatea și compoziția chimică).

Inflamabilitatea gazului se stabilește cu un chibrit aprins apropiat de robinetul superior al releului de gaze, care se deschide ușor.

Inflamabilitatea gazului indică existența unui defect interior. Dacă gazele sînt incolore și nu ard, atunci aerul degajat din ulei este cauza pentru care a funcționat releul.

Analizînd culoarea gazului, se obțin informații despre natura defectului. Culoarea alb-gri a gazului se datorește hîrtiei sau cartonului; culoarea galbenă se datorește lemnului; culoarea neagră se datorește uleiului. Culoarea gazului dispare însă repede; ea trebuie determinată deci imediat cum apar gazele.

Cantitatea de gaz indică proporția defecțiunii. *Scăderea temperaturii de inflamabilitate* a uleiului indică prezența defectului interior.

Dacă releul a acționat din cauza degajării aerului, atunci acesta va fi evacuat din releul Buchholz. După completarea uleiului în transformator, este necesar a se scoate temporar protecția prin releul de gaze, pentru a preveni deconectarea transformatorului în timpul evacuării aerului. După ce s-a degajat și evacuat aerul, releul se introduce în circuitul de comandă.

În cazul defectării înfășurărilor, este necesară, mai întîi, depistarea locului deteriorării, apoi repararea acestuia. În acest caz, se demontează transformatorul (se decuvează); dacă spirele în scurtcircuit nu se observă la exami-

nare vizuală, ele se pot găsi prin alimentarea transformatorului cu o tensiune redusă, pe partea de joasă tensiune. Spirele în cauză se încălzesc intens și fumegă.

Porțiunile deteriorate ale miezului sau scurtcircuitele dintre tole, datorită buloanelor, se depistează la funcționarea în gol a transformatorului decuvat ; locurile cu defecte ale miezului se vor încălzi intens. Pentru această probă, tensiunea se aplică pe partea de joasă tensiune, gradat ; în prealabil, se vor desface unele conexiuni, divizînd înfășurarea de înaltă tensiune, pentru a nu se produce străpungeri în lipsa uleiului.

Scurtcircuitul între tolele miezului se înlătură prin revizuirea miezului feromagnetic, înlocuindu-se izolația deteriorată cu alta nouă (după îndepărtarea celei vechi). Repararea izolației se face, după caz, cu lac, cu hîrtie, sau prin oxidarea tolelor în cauză, după cum este realizată izolația inițială a tolelor.

6.2.6. TENSIUNEA ÎN CIRCUITUL SECUNDAR AL TRANSFORMATORULUI ESTE ANORMALĂ

A. **Tensiunile de fază din circuitul secundar sînt egale la funcționarea în gol, dar diferă mult în sarcină, cu toate că tensiunile din circuitul primar sînt normale.** Această defecțiune se produce în următoarele cazuri :

— *există un contact imperfect la una din bornele transformatorului*. Se remediază defecțiunea ;

— *este întrerupt circuitul primar* al transformatorului trifazat cu coloane, conectat după schema triunghi-stea sau triunghi-triunghi. Se decuvează transformatorul și se restabilește continuitatea fazelor. Determinarea fazei întrerupte se face cu ajutorul unui ohmmetru.

B. **Tensiunile secundare diferă mult la funcționarea în gol față de tensiunile secundare la funcționarea în sarcină, deși tensiunile primare sînt egale.** Această defecțiune poate să apară în următoarele cazuri :

— *s-a inversat sfîrșitul cu începutul la o fază a înfășurării secundare legate în stea* ;

— *există o întrerupere în circuitul primar* al transformatorului conectat după schema stea—stea. În acest caz, suma fazorială a celor trei tensiuni de linie din circuitul secundar nu este nulă ;

— *există o întrerupere în circuitul secundar* al transformatorului, în cazul conectării în stea-stea sau triunghi-stea. În acest caz, două din tensiunile de linie sînt nule.

Întreruperile din circuitul primar și secundar se vor depista cu ajutorul unui ohmmetru. Funcționarea în două faze a unui transformator este permisă temporar, cu condiția ca intensitatea curentului de sarcină să nu depășească 58% din valoarea curentului nominal.

Pentru înlăturarea acestor defecte, este necesară repararea înfășurărilor sau a legăturilor desfăcute, adică este necesară decuvarea transformatorului.

6.2.7. DEFECTE ALE COMUTATORULUI DE TENSIUNE

Se analizează numai defecțiunile comutatoarelor destinate pentru reglarea raportului de transformare fără sarcină. În principal, fiind vorba de un comutator, defecțiunea constă în arderea sau topirea suprafețelor de contact ale comutatorului. Cauzele care duc la această defecțiune sînt :

— *construcția necorespunzătoare a comutatorului*, care nu asigură presiunea de contact necesară ;

— *montarea defectuoasă a comutatorului* ;

— *efectul termic al unor curenți de scurtcircuit* ;

— *comutarea sub sarcină a comutatorului*, deși el este destinat pentru comutarea în gol.

Topirea totală sau degradarea contactelor comutatorului poate duce la degradarea uleiului și acționarea releului de gaze.

În cazul deteriorării reduse a suprafețelor de contact, acestea se pot ajusta ; dacă degradările sînt mai importante, se vor înlocui contactele sau tot comutatorul. În funcție de construcția comutatorului, trebuie acordată atenție la montare, deoarece pot apărea defecte de montaj, care pot avaria transformatorul.

Pentru a descoperi la timp defectele comutatorului, se recomandă măsurarea periodică a rezistenței înfășurărilor cu un ohmmetru, pe toate pozițiile comutatorului. Dacă apar diferențe sensibile în rezistențele măsurate pe fază, este necesară revizuirea comutatorului, eventual refacerea unor lipituri defectoase în înfășurare.

6.2.8. PIERDERI DE ULEI DIN TRANSFORMATOR

Uleiul de transformator este atît mediu electroizolant, cît și mediu de răcire pentru părțile active. De aceea, este foarte importantă menținerea nivelului uleiului între anumite limite, care să asigure o bună funcționare a transformatorului.

În funcție de construcția transformatorului, pierderile de ulei pot avea loc în următoarele locuri :

— *la îmbinarea prin sudare* a cuvei cu țevile de răcire sau a pereților cu fundul cuvei. Pentru remediere, se golește cuva de ulei (după decuvarea transformatorului) și se sudează autogen locurile de scurgere. După sudare, se încarcă cuva cu apă și se încearcă la presiunea unei coloane de apă cu 1,5m mai înaltă decît nivelul uleiului din conservator ;

— *între capacul și cuva transformatorului* dacă sînt spații neetanșate. Se string șuruburile care fixează capacul ; în caz de necesitate, se schimbă garnitura cu una nouă ;

— *între îmbinările radiatoarelor cu cuva, a conservatorului cu releul Buchholz, a izolatorilor cu capacul* etc. Se vor strînge buloanele sau se vor schimba, în caz de necesitate, garniturile de etanșare.

6.3. MĂSURI DE TEHNICĂ A SECURITĂȚII MUNCII LA REPARAREA TRANSFORMATOARELOR

În funcție de marea diversitate a operațiilor ce se execută, în timpul reparației transformatoarelor, se impune a se respecta următoarele măsuri de tehnică a securității muncii:

— La exploatarea instalațiilor, utilajelor și aparatajului electric din dotarea atelierului se vor respecta instrucțiunile de exploatare și normele de electrosecuritate proprii acestora.

— Lucrătorii care, în timpul lucrului, folosesc unelte de mînă ce produc așchii, scîntei etc. vor purta ochelari de protecție.

— Uneltele de mînă trebuie verificate la începutul schimbului și, periodic, în funcție de frecvența de utilizare.

— La decuvarea transformatoarelor, se vor lua toate măsurile pentru a asigura stabilitatea părții decuvabile, evitîndu-se orice posibilitate de răsturnare.

— Transformatoarele mari și schelele de montaj se vor așeza în ateliere pe platforme de beton pentru a preveni răsturnările; transformatoarele mici se așază pe suportul metalic.

— La executarea lipiturilor, se vor lua măsuri pentru prevenirea incendiilor sau a exploziilor. De asemenea, și la manevrarea și depozitarea uleiului de transformator, se vor lua măsurile necesare pentru prevenirea incendiilor și a exploziilor.

— La manevrarea transformatoarelor cu macaraua, se vor lua măsuri pentru înlăturarea posibilităților de accidentare. Nu se va sta sub sarcina macaralei.

— Toate încercările efectuate asupra transformatoarelor se vor face în standul de probe sau în puncte de control de către personal instruit în acest scop.

— Este interzis accesul în standul de probă sau în punctele de control al persoanelor străine (în timpul încercărilor). Accesul acestor persoane este admis cînd nu se fac probe, dar numai cu însoțitor.

— Începerea probelor se va face numai după ce conducătorul standului (sau al punctului de control) va verifica dacă toate utilajele ce urmează a fi folosite sînt corect instalate.

Standurile de probă care utilizează tensiuni peste 1 kV, sînt prevăzute cu covoare electroizolante. Ușile se prevăd cu blocaje electrice, care nu se deschid în timpul probelor.

— În timpul probelor, operatorul trebuie să fie tot timpul la pupitrul de comandă pentru ca, în caz de necesitate, să întrerupă imediat alimentarea cu energie electrică.

— La efectuarea probelor transformatoarelor în afara standului de probă, transformatoarele se vor lega la pămînt și se vor înconjura cu bandă albă, iar locul va fi marcat cu plăcuțe avertizoare și supravegheat de personal special instruit.

În timpul probelor de străpungere, se va opri orice altă activitate pe stand.

TABELUL 1-1

Dimensiunile și secțiunile conductoarelor rotunde din cupru (Extras din STAS 685-75)

Diametrul nominal mm	Abateri limită admisibile la diametrul nom	Secțiunea nominală mm²	Masa kg/km	Rezistența electrică la 20°C în curent continuu Ω/m		
				nom.	minim	maxim
1	2	3	4	5	6	7
0,020	±0,002	0,000314	0,0028	54,88	46,85	65,31
0,025		0,000491	0,0044	35,12	30,56	41,09
0,032		0,000804	0,0072	21,44	18,87	24,44
0,040		0,00126	0,0112	13,72	12,21	15,37
0,050		0,00196	0,0175	8,781	7,903	9,659
0,063		0,00312	0,0277	5,531	5,033	6,029
0,071	±0,003	0,00396	0,0352	4,355	3,985	4,725
0,080		0,00503	0,0447	3,430	3,156	3,704
0,090		0,00636	0,0566	2,710	2,507	2,913
0,100		0,00785	0,0699	2,195	2,042	2,349
0,112		0,00985	0,0877	1,750	1,646	1,864
0,125		0,01227	0,109	1,405	1,328	1,488
0,140		0,01539	0,137	1,120	1,064	1,180
0,160		0,02011	0,179	0,8575	0,8192	0,8982
0,180		0,02545	0,226	0,6775	0,6499	0,7068
0,200		0,03142	0,280	0,5488	0,5281	0,5706
0,224		0,03941	0,351	0,4375	0,4224	0,4534
0,250	±0,004	0,04909	0,437	0,3512	0,3378	0,3659
0,280		0,06158	0,548	0,2800	0,2698	0,2907
0,315		0,07793	0,694	0,2212	0,2139	0,2289
0,355		0,09898	0,881	0,1742	0,1689	0,1797
0,400	±0,005	0,1257	1,12	0,1372	0,1327	0,1419
0,450		0,1590	1,42	0,1084	0,1051	0,1118
0,500		0,1964	1,75	0,08781	0,08534	0,09037
0,560	±0,006	0,2463	2,19	0,07000	0,06790	0,07215
0,630		0,3117	2,77	0,05531	0,05381	0,05687
0,710	±0,007	0,3959	3,52	0,04355	0,04234	0,04481
0,750	±0,008	0,4418	3,93	0,03903	0,03785	0,04022
0,800		0,5027	4,47	0,03430	0,03334	0,03530
0,850	±0,009	0,5675	5,05	0,03038	0,02950	0,03131
0,900		0,6362	5,66	0,02710	0,02634	0,02789
0,950	±0,010	0,7088	6,31	0,02432	0,02352	0,02506
1,000		0,7854	6,99	0,02195	0,02134	0,02259

TABELUL 1-I (continuare)

1	2	3	4	5	6	7
1,060		0,8825	7,85	0,01953	—	—
1,120	±0,011	0,9852	8,77	0,01750	—	—
1,180	±0,012	1,094	9,74	0,01576	—	—
1,250		1,227	10,9	0,01405	—	—
1,320	±0,013	1,368	12,2	0,01259	—	—
1,400	±0,014	1,539	13,7	0,01120	—	—
1,500	±0,015	1,767	15,7	0,009757	—	—
1,600	±0,016	2,011	17,9	0,008575	—	—
1,700	±0,017	2,270	20,2	0,007596	—	—
1,800	±0,018	2,545	22,6	0,006775	—	—
1,900	±0,019	2,835	25,2	0,006081	—	—
2,000	±0,020	3,142	28,0	0,005488	—	—
2,120	±0,021	3,530	31,4	0,004884	—	—
2,240	±0,022	3,941	35,1	0,004375	—	—
2,360	±0,024	4,374	38,9	0,003941	—	—
2,500	±0,025	4,909	43,7	0,003512	—	—
2,650	±0,027	5,515	49,1	0,003126	—	—
2,800	±0,028	6,158	54,8	0,002800	—	—
3,000	±0,030	7,069	62,9	0,002439	—	—
3,150	±0,031	7,793	69,4	0,002212	—	—
3,350	±0,034	8,814	78,4	0,001956	—	—
3,550	±0,036	9,898	88,1	0,001742	—	—
3,750	±0,038	11,04	98,3	0,001561	—	—
4,000	±0,040	12,57	112,0	0,001372	—	—
4,250	±0,043	14,19	126,3	0,001212	—	—
4,500	±0,045	15,90	142,0	0,001084	—	—
4,750	±0,048	17,72	157,2	0,0009730	—	—
5,000	±0,050	19,64	175,0	0,0008781	—	—

TABELUL 1-II

Dimensiunile şi secţiunile conductoarelor rotunde din aluminiu (Extras din STAS 3052-71)

Diametrul nominal mm	Abateri limită admisibile la diametrul nominal mm	Secţiunea nominală mm^2	Masa informativă kg/km	Diametrul nominal mm	Abateri limită admisibile la diametru mm	Secţiunea nominală mm^2	Masa informativă kg/km
1	2	3	4	1	2	3	4
0,100		0,00785	0,0212	1,500		1,767	4,77
0,112		0,00985	0,0266	1,550		1,887	5,09
0,125		0,01227	0,0332	1,600	±0,020	2,0110	5,43
0,140		0,01539	0,0416	1,650		2,131	5,70
0,160	±0,005	0,02011	0,0543	1,700		2,270	6,13
0,180		0,02545	0,0687				
0,200		0,03142	0,0848	1,800		2,5450	6,87
0,224		0,03941	0,107	1,900		2,8350	7,66
				2,000	±0,025	3,142	8,48
0,250		0,04909	0,133	2,120		3,5299	9,53
0,280	±0,007	0,06158	0,166	2,240		3,9408	10,60
0,315		0,07793	0,211				

TABELUL 1-11 (continuare)

1	2	3	4
0,400		0,1257	0,339
0,450		0,1590	0,429
0,500	±0,009	0,1964	0,530
0,560		0,2463	0,665
0,630		0,3117	0,842
0,710		0,3959	1,070
0,750		0,4418	1,19
0,800		0,5027	1,36
0,850	±0,012	0,5675	1,53
0,900		0,6362	1,72
0,950		0,7088	1,91
1,000		0,7854	2,12
1,060		0,8825	2,38
1,120		0,9852	2,66
1,180	±0,016	1,0936	2,95
1,250		1,2272	3,31
1,320		1,3685	3,70
1,400		1,5390	4,16
2,360		4,3744	11,80
(2,400)		4,5350	12,20
2,500		4,9090	13,30
2,650	±0,03	5,5155	14,90
2,800		6,1580	16,60
(2,900)		6,61	18,00
3,000		7,069	19,10
3,150		7,7931	21,00
3,350		8,8141	23,80
3,550	±0,04	9,8980	26,70
3,700		11,045	29,80
4,000		12,570	33,90

Observație. Diametrele nominale pînă la 0,70 mm inclusiv sînt după șirul R 20. Cele peste 0,70 sînt după șirul R 40, cu excepția celor încadrate în paranteze care se vor evita.

TABELUL 2-1

Dimensiunile și secțiunile conductoarelor profilate din cupru (Extras

SÎRME

b \ a	0,8	0,9	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12	2,24	2,36	2,5	2,65
2	1,46	1,63	1,79	1,90	2,03	2,14	2,30	2,42	2,59	—	3,00	—	3,25	—	3,64					
2,12	1,56	1,73	1,91	2,03	2,16	—	2,44	2,59	2,75	—	3,18	3,24	3,45	—	—	4,14				
2,24	1,66	1,84	2,03	2,16	2,29	2,43	2,59	2,74	2,92	3,14	3,37	3,65	3,67	—	4,12	—	4,64			
2,36	1,75	1,95	2,14	—	2,43	—	2,73	—	3,09	—	3,56	—	—	—	—	—	—			
2,5	1,86	2,08	2,29	2,44	2,59	2,74	2,91	3,09	3,29	3,54	3,79	3,89	4,11	4,39	4,64	4,94	—	5,33	5,70	
2,65	1,98	2,21	2,44	2,60	2,75	—	3,10	3,29	3,50	—	4,03	4,14	4,41	4,67	—	5,28	5,58	5,76	—	6,47
2,8	2,13	2,35	2,59	2,75	2,92	3,09	3,29	3,48	3,71	3,98	4,27	4,40	4,68	4,96	5,24	5,58	5,99	6,05	6,45	—
3	2,26	2,53	2,79	2,97	3,15	—	3,54	3,75	3,99	—	4,59	4,74	5,04	5,34	5,64	6,00	6,33	6,52	—	7,49
3,15	2,38	2,66	2,94	3,12	3,31	3,50	3,72	3,94	4,20	4,51	4,83	4,99	5,31	5,62	5,94	6,32	6,69	6,85	7,19	7,80
3,35	2,54	2,84	3,13	—	3,54	—	3,97	—	4,47	—	5,14	—	5,67	—	6,34	—	7,14	—	—	—
3,55	2,73	3,02	3,34	3,55	3,76	3,97	4,22	4,47	4,76	5,11	5,47	5,67	6,03	6,38	6,74	7,16	7,58	7,83	8,33	8,20
3,75	2,80	3,20	3,54	3,76	3,99	—	4,47	4,74	5,04	—	5,79	6,16	6,39	6,76	7,14	7,60	8,04	8,32	8,83	9,45
4	3,00	3,43	3,79	4,03	4,27	4,50	4,79	5,07	5,39	5,78	6,19	6,44	6,87	7,24	7,64	8,16	8,56	8,91	9,45	10,1
4,25	3,26	3,65	4,03	—	4,54	—	5,10	—	5,72	—	6,58	—	7,29	—	8,14	—	9,16	—	10,1	—
4,5	3,46	3,88	4,29	4,56	4,83	5,09	5,41	5,73	6,09	6,53	6,98	7,29	7,74	8,19	8,64	9,18	9,72	10,1	10,7	10,7
4,75	3,66	4,10	4,54	4,82	5,11	—	5,72	6,05	6,44	—	7,39	7,71	8,19	8,66	9,14	9,76	10,3	10,5	11,3	12,0
5	3,86	4,33	4,79	5,09	5,39	5,68	6,04	6,39	6,79	7,28	7,79	8,14	8,64	9,14	9,54	10,2	10,8	11,[illegible]	12,0	12,7
5,3	4,10	4,60	5,08	—	5,72	—	6,41	—	7,20	—	8,26	—	9,16	—	10,2	—	11,5	—	12,7	—
5,6	4,34	4,87	5,39	5,72	6,06	6,39	6,79	7,18	7,63	8,18	8,75	9,46	9,72	10,3	10,5	11,5	12,2	12,[illegible]	13,5	14,3
6	4,66	5,23	5,79	6,15	6,51	—	7,19	7,70	8,19	—	9,39	10,0	10,4	11,2	11,6	12,3	13,1	13,7	14,4	15,4
6,3	4,90	5,50	6,09	6,46	6,84	7,22	7,66	8,10	8,61	9,23	9,87	10,4	11,0	11,6	12,5	13,0	13,6	14,[illegible]	15,2	16,3
b \ a	0,8	0,9	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12	2,24	2,36	2,5	2,65

(în STAS 2873-78)

DREPTUNGHIULARE

2,8	3	3,15	3,35	3,55	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,3	5,6	6	6,3	7,1	8	9	10	11,2	a/b
																				2
																				2,12
																				2,24
																				2,36
																				2,5
																				2,65
7,30																				2,8
7,85	—																			3
8,26	8,90	9,37																		3,15
	—	10,0	—																	3,35
9,30	—	10,7	11,4	12,1																3,55
10,0	—	11,3	12,0	12,6	13,3															3,75
10,7	—	12,1	12,9	13,7	14,2	15,1														4
11,3	—	—	—	—	—	16,2	—													4,25
12,3	12,9	13,7	14,5	15,4	16,0	16,7	18,3	19,3												4,5
12,8	—	14,4	15,3	16,5	17,0	—	19,3	—	21,7											4,75
13,5	14,6	15,2	16,2	17,2	17,9	19,1	20,4	21,6	—	24,1										5
14,3		16,1	—	18,3	—				—	25,6	—									5,3
15,1	16,2	17,1	18,2	19,3	20,1	21,5	22,9	24,2	25,7	27,6	28,8	30,5								5,6
16,3	—	18,3	19,6	20,8	21,6	23,1	24,6	26,0	27,6	—	30,9		35,1							6
17,1	18,3	19,3	20,6	21,8	22,8	24,3	25,9	27,5	29,0	30,6	32,5	34,4	36,9	38,8						6,3
2,8	3	3,15	3,35	3,55	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,3	5,6	6	6,3	7,1	8	9	10	11,2	a/b

TABELUL 2-1 (continuare)

b \ a	0,8	0,9	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12	2,24	2,36	2,5	2,65
6,7		5,80	6,48	—	7,29	—	8,16	—	9,16	—	10,5	—	11,7	—	13,0	—	14,7	—	16,2	—
7,1		6,22	5,89	7,31	7,74	8,16	8,66	9,16	9,73	10,4	11,2	11,7	12,4	13,1	13,8	14,7	15,5	16,2	17,2	18,2
7,5			7,20	7,73	8,19	—	9,16	9,68	10,3	—	11,8	12,3	13,1	13,8	14,7	15,5	16,4	17,1	18,2	19,4
8			7,79	8,27	8,75	9,22	9,79	10,4	11,0	11,8	12,6	13,2	14,0	14,8	15,6	16,6	17,6	18,3	19,5	20,7
8,5			8,20	8,80	9,31	—	10,4	11,0	11,7	—	13,4	14,0	15,0	15,7	16,6	17,6	18,7	19,5	20,7	22,0
9			8,79	9,33	9,87	10,4	11,0	11,7	12,4	13,2	14,2	14,9	15,8	16,7	17,6	18,7	19,8	20,7	22,0	23,3
9,5				—	—	—	11,7	—	13,1	—	15,0	—	16,7	—	18,6	—	20,9	—	23,2	—
10					11,0	—	12,3	13,0	13,8	14,8	15,8	16,6	17,6	18,6	19,6	20,8	22,0	23,0	24,5	26,0
10,6						—	—	13,8	14,6	—	16,8	17,6	18,7	19,7	20,8	22,1	23,4	24,4	26,0	27,6
11,2						—	13,8	14,6	15,5	16,6	17,7	18,7	19,8	20,9	22	23,4	24,7	25,9	27,5	29,1
11,8								—	—	—	18,7	—	20,9	—	23,2	—	26,1	—	29,0	—
12,5									17,9	18,5	19,8	20,9	22,1	23,4	24,6	26,1	27,6	29,0	30,7	32,5
13,2										—	20,9	22,0	23,4	24,7	26,0	27,6	29,2	30,7	32,4	34,0
14											22,2	23,4	24,8	26,2	27,6	29,3	31,0	32,5	34,5	36,6
15												—	26,0	28,1	29,6	31,4	33,2	34,8	37,0	39,2
16													28,4	—	31,6	33,6	35,5	27,3	39,5	41,8
17														31,9	—	35,6	37,7	39,5	—	44,3
18															35,6	37,7	40,0	41,9	44,5	47,2
19																—	42,2	44,2	—	49,7
20																	44,4	—	49,5	52,5
22																			—	—
25																				
26,5																				
28																				
30																				
32																				
36																				
b / a	0,8	0,9	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12	2,24	2,36	2,5	2,65

TABELUL 2-1 (continuare)

2,8	3	3,15	3,35	3,55	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,3	5,6	6	6,3	7,1	8	9	10	11,2	a/b
18,2	—	20,6	—	23,2	—	25,9	—	29,3	—	—	—	—	—	—						6,7
19,3	20,7	21,8	23,2	24,7	25,8	27,5	29,3	31,1	32,9	34,6	36,8	38,9	41,7	43,8	49,3					7,1
20,5	—	23,1	24,6	26,1	27,3	29,1	31,0	32,9	34,8	36,6	38,9	41,1	44,1	46,3	52,4					7,5
21,9	23,1	24,6	26,3	27,9	29,1	31,1	33,1	35,1	37,1	39,1	41,5	43,9	47,1	49,5	55,9	63,1				8
23,3	—	26,2	28,0	29,6	31,0	33,1	35,2	37,4	39,5	—	44,2	46,7	50,1	52,7	59,3	67,1				8,5
24,7	26,4	27,8	29,6	31,4	32,9	35,1	37,4	39,6	41,9	44,1	46,8	49,5	53,1	55,8	63,0	71,1	80,1			9
26,0	—	29,4	—	33,2	—	37,1	—	41,9	—	46,6	—	52,3	—	—	—	—	—			9,5
27,5	29,5	30,9	33,3	35,6	36,6	39,1	41,6	44,1	46,6	49,1	52,1	55,1	59,1	62,1	70,1	79,1	89,1	99,1		10
29,1	—	32,8	35,0	37,4	38,9	41,5	44,2	46,8	49,5	52,1	55,3	58,5	62,7	65,9	74,3	83,9	94,6	—		10,6
30,9	33,0	34,7	37,0	39,2	41,1	43,9	46,7	49,5	52,3	55,1	58,5	61,9	66,3	69,7	78,7	88,7	100	111	125	11,2
32,5	—	36,6	—	41,3	—	46,3	—	52,2	—	58,1	—	65,2	—	—	—	—	—	—	—	11,8
34,5	37,0	38,8	41,3	43,8	46,0	49,1	52,3	55,4	58,5	61,6	65,4	69,1	74,1	77,8	87,9	99,1	112	124	139	12,5
36,4	—	41,0	43,7	46,3	48,7	51,9	55,2	58,5	61,8	65,1	69,1	73,1	78,3	82,3	92,8	105	118	—		13,2
38,7	41,4	43,6	46,4	49,2	52,0	55,1	58,8	62,1	65,6	69,1	73,3	77,5	83,1	87,3	98,5	111	125	139		14
41,5	—	46,7	49,7	52,7	55,3	59,1	62,9	66,6	70,3	74,1	78,6	83,1	89,1	93,7	106	119	134	149		15
44,3	47,5	49,9	53,0	56,3	59,1	63,1	67,4	71,1	75,1	79,1	83,9	88,7	95,1	100	113	127				16
47,1	—	53,0	56,4	59,9	62,9	—	71,4	75,6	79,8	—	89,2	94,3	101	106	120	135				17
49,9	—	56,2	59,8	63,4	66,6	71,1	75,6	80,1	84,6	89,1	94,6	100	107	112	127	143				18
52,7	—	59,3	63,1	66,9	70,4	—	79,8	84,6	89,3	—	100	106	113	119	134	151				19
—	59,5	62,5	—	70,5	—	79,1	—	89,1	—	99,1	—	111	119	125	141	159				20
61,1	—	68,8	73,1	77,5	81,6	—	92,6	98,1	101	109	116	122	131	138	155					22
69,5	74,5	78,2	83,2	88,2	92,9	99,1	105	112	118	124	132	139	149	157						25
		83,0	88,2	93,5	98,5	—	111	118	125	—	140	147	158							26,5
		87,7	93,2	98,9	104	111	118	125	132	139	148	156	167							28
			—	106	112	119	127	134	142	149	158	167								30
					119	127	135	143	151											32
						143	152	161	170											36
2,8	3	3,15	3,35	3,55	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,3	5,6	6	6,3	7,1	8	9	10	11,2	a/b

TABELUL 2-11

Dimensiunile și secțiunile conductoarelor profilate din aluminiu (Extras din STAS 6499/1-74)

SÎRME DREPTUNGHIULARE

b \ a	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,50
2,00	1,79	1,90	2,03	2,14	2,29	2,42	2,50	—
2,12	1,91	2,03	2,16	—	2,44	2,59	2,75	—
2,24	1,99	2,16	2,29	2,43	2,59	2,74	2,92	3,14
2,36	2,14	—	2,43	—	2,73	—	3,09	—
2,50	2,29	2,44	2,59	2,74	2,91	3,09	3,29	3,50
2,65	2,44	2,6	2,75	—	3,10	3,29	3,50	—
2,80	2,59	2,75	2,92	3,09	3,29	3,48	3,71	3,98
3,00	2,79	2,97	3,15	—	3,54	3,75	3,99	—
3,15	2,93	3,12	3,31	3,50	3,72	3,94	4,20	4,51
3,35	3,13	—	3,54	—	3,97	—	4,47	—
3,55	3,34	3,55	3,76	3,97	4,22	4,47	4,76	5,11
3,75	3,54	3,76	3,99	—	4,47	4,74	5,04	—
4,00	3,79	4,03	4,27	4,50	4,79	5,07	5,39	5,78
4,25	4,03	—	4,54	—	5,10	—	5,75	—
4,50	4,29	4,56	4,83	5,09	5,41	5,73	6,09	6,53
4,75	4,54	4,82	5,11	—	5,72	6,06	6,44	—
5,00	4,79	5,09	5,39	5,68	6,04	6,39	6,79	7,28
5,30	5,08	—	5,72	—	6,41	—	7,20	—
5,60	5,39	5,72	6,06	6,39	6,79	7,18	7,63	8,18
6,00	5,79	6,15	6,51	—	7,29	7,70	8,19	—
6,30	6,09	6,46	6,84	7,22	7,66	8,10	8,61	9,23
6,70	6,48	—	7,29	—	8,16	—	9,16	—
7,10	6,89	7,31	7,74	8,16	8,66	9,16	9,73	10,4
7,50	7,29	7,73	8,19	—	9,16	9,68	10,3	—
8,00	7,79	8,27	8,75	9,22	9,79	10,4	11,0	11,8
8,50	8,29	8,80	9,31	—	10,4	11,0	11,7	—
9,00	8,79	9,38	9,87	10,4	11,0	11,7	12,4	13,3
9,50	—	—	—	—	11,7	—	13,1	—
10,0	—	—	11,0	—	12,3	13,0	13,8	14,8
10,6	—	—	—	—	—	13,8	14,6	—
11,2	—	—	—	—	13,8	14,6	15,5	16,6
11,8	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	—	—	—	—	—	—	17,3	18,5
13,2	—	—	—	—	—	—	—	—
14,0	—	—	—	—	—	—	—	—

TABELUL 2-11 (continuare)

b \ a	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12	2,24	2,36
2,00	3,00	—	3,25	—	3,64	—	—	—
2,12	3,18	3,24	3,45	—	—	4,14	—	—
2,24	3,37	3,65	3,67	—	4,12	—	4,64	—
2,36	3,56	—	—	—	—	—	—	—
2,50	3,79	3,89	4,14	4,39	4,64	4,94	—	5,35
2,65	4,03	4,14	4,41	4,67	—	5,26	5,58	5,70
2,80	4,27	4,40	4,68	4,96	5,24	5,58	5,90	6,05
3,00	4,59	4,71	5,04	5,34	5,64	6,00	6,38	6,52
3,15	4,83	4,99	5,31	5,62	5,94	6,32	6,69	6,85
3,35	5,10	—	5,67	—	6,34	—	7,14	—
3,55	5,37	5,67	6,03	6,38	6,74	7,16	7,59	7,83
3,75	5,70	6,16	6,39	6,76	7,14	7,60	8,04	8,32
4,00	6,19	6,44	6,87	7,24	7,64	8,18	8,50	8,91
4,25	6,58	—	7,29	—	8,14	—	9,16	—

TABELUL 2-11 (continuare)

b \ a	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12	2,24	2,36
4,50	6,98	7,29	7,74	8,19	8,64	9,18	9,72	10,1
4,75	7,39	7,71	8,19	8,66	9,11	9,76	10,3	10,7
5,00	7,79	8,14	8,64	9,14	9,64	10,2	10,8	11,3
5,30	8,26	—	9,18	—	10,2	—	11,5	—
5,60	8,75	9,16	9,72	10,3	10,8	11,5	12,2	12,7
6,00	9,39	10,0	10,4	11,2	11,6	12,3	13,1	13,7
6,30	9,87	10,4	11,0	11,6	12,2	13,0	13,8	14,3
6,70	10,5	—	11,7	—	13,0	—	14,7	—
7,10	11,2	11,7	12,4	13,1	13,8	14,7	15,5	16,2
7,50	11,8	12,3	13,1	13,8	14,6	15,5	16,4	17,1
8,00	12,6	13,2	14,0	14,8	15,6	16,6	17,6	18,3
8,50	13,4	14,0	15,0	15,7	16,6	17,6	18,7	19,5
9,00	14,2	14,9	15,8	16,7	17,6	18,7	19,8	20,7
9,50	15,0	—	16,7	—	18,6	—	20,9	—
10,0	15,8	16,6	17,6	18,6	19,6	20,8	22,0	23,0
10,6	16,8	17,6	18,7	19,7	20,8	22,1	23,4	24,4
11,2	17,7	18,7	19,8	20,9	22,0	23,4	24,7	25,9
11,8	18,7	—	20,9	—	23,2	—	26,1	—
12,5	19,8	20,9	22,1	23,4	24,6	26,1	27,6	29,0
13,2	20,9	22,0	23,4	24,7	26,0	27,6	29,2	30,7
14,0	22,2	23,4	24,8	26,2	27,6	29,3	31,0	32,5
15,0	—	—	26,6	28,1	29,6	31,4	33,2	34,8
16,0	—	28,4	28,4	—	31,6	33,6	35,5	37,2
17,0	—	—	—	31,9	—	35,6	37,7	39,5
18,0	—	—	—	—	35,6	37,7	40,0	41,9
19,0	—	—	—	—	—	—	42,2	44,2
20,0	—	—	—	—	—	—	44,4	—

TABELUL 2-11 (continuare)

b \ a	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75
2,50	5,70	—	—	—	—	—	—	—
2,65	—	6,47	—	—	—	—	—	—
2,80	6,45	—	7,30	—	—	—	—	—
3,00	—	7,40	7,85	—	—	—	—	—
3,15	7,32	7,80	8,20	8,90	9,37	—	—	—
3,35	—	—	—	—	10,0	—	—	—
3,55	8,33	8,92	9,39	—	10,7	11,4	12,1	—
3,75	8,83	9,46	10,1	—	11,3	12,0	12,8	13,3
4,00	9,45	10,1	10,7	—	12,1	12,9	13,7	14,2
4,25	10,1	—	11,3	—	—	—	—	—
4,50	10,7	11,4	12,1	12,9	13,7	14,5	15,4	16,0
4,75	11,3	12,0	12,8	—	14,4	15,3	16,3	17,0
5,00	12,0	12,7	13,5	14,5	15,2	16,2	17,2	17,9
5,30	12,7	—	14,3	—	16,1	—	18,3	—
5,60	13,5	14,3	15,1	16,2	17,1	18,2	19,3	20,1
6,00	14,4	15,4	16,3	—	18,3	19,8	20,8	21,6
6,30	15,2	16,2	17,1	18,3	19,3	20,6	21,8	22,8
6,70	16,2	—	18,2	—	20,6	—	22,2	—
7,10	17,2	18,3	19,3	20,7	21,8	23,2	24,7	25,8
7,50	18,2	19,4	20,5	—	23,1	24,6	26,1	27,3
8,00	19,5	20,7	21,9	23,4	24,6	26,3	27,9	29,1
8,50	20,7	22,0	23,3	—	26,2	28,0	29,6	31,0
9,00	22,0	23,3	24,7	26,4	27,8	29,6	31,4	32,9
9,50	23,2	—	26,0	—	29,4	—	33,2	—
10,0	24,5	26,0	27,5	29,5	30,9	33,0	35,0	36,6
10,6	26,0	27,6	29,1	—	32,8	35,0	37,1	38,9

TABELUL 2-11 (continuare)

b \ a	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75
11,2	27,5	29,1	30,8	33,0	34,7	37,0	39,2	41,1
11,8	29,0	—	32,5	—	36,6	—	41,3	—
12,5	30,7	32,6	34,5	37,0	38,8	41,3	43,8	46,0
13,2	32,4	34,6	36,4	—	41,0	43,3	46,3	48,7
14,0	34,5	36,6	38,7	41,4	43,6	46,4	49,2	52,0
15,0	37,0	39,2	41,5	—	46,7	49,7	52,7	55,3
16,0	39,5	41,8	44,3	47,5	49,9	53,0	56,3	59,1
17,0	—	44,5	47,1	—	53,0	56,4	59,9	62,9
18,0	44,5	47,2	49,9	—	56,2	59,8	63,7	66,6
19,0	—	49,7	52,7	—	59,3	63,1	66,9	70,4
20,0	49,5	52,5	—	59,5	62,5	—	70,5	—
22,0	—	—	61,1	—	68,8	73,1	77,5	81,6
25,0	—	—	69,5	74,5	78,2	83,2	88,2	92,9
26,5	—	—	—	—	83,0	88,2	93,5	98,5
28,0	—	—	—	—	87,7	93,2	98,9	104
30,0	—	—	—	—	—	—	106	112
32,0	—	—	—	—	—	—	—	119

TABELUL 2-11 (continuare)

b \ a	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60	6,00	6,30
4,00	15,1	—	—	—	—	—	—	—	—
4,25	16,2	—	—	—	—	—	—	—	—
4,50	16,7	18,3	19,3	—	—	—	—	—	—
4,75	—	19,3	—	21,7	—	—	—	—	—
5,00	19,1	20,4	21,6	—	24,1	—	—	—	—
5,30	—	—	—	—	25,6	—	—	—	—
5,60	21,5	22,9	24,2	25,7	27,6	28,8	30,5	—	—
6,00	23,1	24,6	26,0	27,6	—	30,9	—	35,1	—
6,30	24,3	25,9	27,5	29,0	30,6	32,5	34,4	36,9	38,8
6,70	25,9	—	29,3	—	—	—	—	—	—
7,10	27,5	29,3	31,1	32,9	34,6	36,8	38,9	41,7	43,8
7,50	29,1	31,0	32,9	34,8	36,6	38,9	41,1	44,1	46,3
8,00	31,1	33,1	35,1	37,1	39,1	41,5	43,9	47,1	49,5
8,50	33,1	35,2	37,4	39,5	—	44,2	46,7	50,1	52,7
9,00	35,1	37,4	39,6	41,9	44,1	46,8	49,5	53,1	55,8
9,50	37,1	—	41,9	—	46,6	—	52,3	—	—
10,0	39,1	41,6	44,1	46,6	49,1	52,1	55,1	59,1	62,1
10,6	41,5	44,2	46,8	49,5	52,1	55,3	58,5	62,7	65,0
11,2	43,9	46,7	49,5	52,3	55,1	58,5	61,9	66,3	69,7
11,8	46,3	—	52,2	—	58,1	—	65,2	—	—
12,5	49,1	52,3	55,4	58,5	61,6	65,4	69,1	74,1	77,8
13,2	51,9	55,2	58,2	61,8	65,1	69,1	73,1	78,3	82,3
14,0	55,1	58,6	62,1	65,6	69,1	73,3	77,5	83,1	87,3
15,0	59,1	62,9	66,6	70,3	74,1	78,6	83,1	89,1	93,7
16,0	63,1	67,1	71,1	75,1	79,1	83,9	88,7	95,1	100
17,0	—	71,4	75,6	79,8	—	89,2	94,3	101	106
18,0	71,1	75,6	80,1	84,6	89,1	94,6	100	107	112
19,0	—	79,8	84,6	89,3	—	100	106	113	119
20,0	79,1	—	89,1	—	99,1	—	111	119	125
22,0	—	92,6	98,1	104	109	116	122	131	138
25,0	99,1	105	112	118	124	132	139	149	157
26,5	—	111	118	125	—	140	147	158	—
28,0	111	118	125	132	139	148	156	167	—
30,0	119	127	134	142	149	158	167	—	—
32,0	127	135	143	151	—	—	—	—	—
36,0	143	152	161	170	—	—	—	—	—

TABELUL 2-II (continuare)

b \ a	7,1	8	9	10	11,2	12,5	13,5	14,5	15,5	16
7,10	49,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7,50	52,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8,00	55,9	63,1	—	—	—	—	—	—	—	—
8,50	59,3	67,1	—	—	—	—	—	—	—	—
9,00	63,0	71,1	80,1	—	—	—	—	—	—	—
9,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10,0	70,1	79,1	89,1	99,1	—	—	—	—	—	—
10,6	74,3	83,9	94,6	—	—	—	—	—	—	—
11,2	78,7	88,7	100	111	125	—	—	—	—	—
11,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	87,9	99,1	112	124	139	156	—	—	—	—
13,2	92,8	105	118	—	—	—	178	—	—	—
14,0	98,5	111	125	139	—	—	—	203	—	—
15,0	106	119	134	149	—	—	—	—	232	—
16,0	113	127	—	—	—	—	—	—	—	255
17,0	120	135	—	—	—	—	—	—	—	—
18,0	127	143	—	—	—	—	—	—	—	—
19,0	134	151	—	—	—	—	—	—	—	—
20,0	141	159	—	—	—	—	—	—	—	—
22,0	155	—	—	—	—	—	—	—	—	—

TABELUL 2-III

b \ a	5,00	5,30	5,60	6,00	6,30	7,10	8,00	9,00	10,0	11,2	12,5
16,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	178	199
18,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	200	—
20,0	—	—	—	—	—	—	—	—	199	223	249
22,0	—	—	—	—	—	—	—	197	—	245	—
25,0	—	—	—	—	—	177	199	224	249	279	311
28,0	—	—	—	167	175	198	—	251	—	313	—
32,0	—	169	178	191	201	226	—	287	—	357	—
36,0	179	—	201	215	226	—	287	—	359	—	449
40,0	199	—	223	239	251	283	319	359	399	447	499
45,0	224	—	251	269	283	310	359	404	449	498	562
50,0	249	—	279	299	314	351	399	449	499	559	624
56,0	279	—	313	335	352	397	449	503	559	—	699
63,0	314	—	352	377	396	400	503	566	629	—	787
71,0	—	—	—	—	—	—	567	638	709	—	886
80,0	—	—	—	479	—	567	639	—	799	—	999
90,0	—	—	—	539	—	638	719	—	899	—	1 121
100	—	—	—	599	—	709	799	—	999	—	1 219
105	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1 270
110	—	—	—	—	—	—	—	990	—	—	—
120	—	—	—	—	—	—	959	1 079	—	—	1 450
125	—	—	—	—	—	—	—	1 124	—	—	—
130	—	—	—	—	—	—	—	1 169	—	—	—

Grosimea bilaterală a izolației conductoarelor

($d' - d$, respectiv $a' - a$ şi $b' - b$, unde $a < b$)

TABELUL 3-1

Izolație cu email tereftalic și sticlă (clasa F)

Izolația		Simbol	Conductor rotund: diametrul d, în mm								Conductor profilat — latura mică a, mm			
Compunerea			0,1...0,18	0,19...0,29	0,3...0,48	0,5...0,75	0,8...1,45	1,0...2,9	3...3,8	4...6	0,81...1,45	1,5...2,83	3...3,8	4...6
Email tereftalic		E ET	0,015...0,02	0,02...0,04	0,03...0,045	0,03...0,06	0,04...0,08	0,05...0,08	0,08 —	— —	0,03...0,00	0,06...0,1	0,1	0,12
Email tereftalic + sticlă	1 × înfășurare	ES	—	—	—	—	0,25	0,30	—	—	—	—	—	—
	2 × înfășurare	E2S	—	—	—	—	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,50
	3 × înfășurare	E3S	—	—	—	—	—	—	0,50	0,50	—	—	—	—
	1 × țesătură	ET	—	—	—	—	—	—	—	—	0,45	0,45	0,50	0,55
	1 × înfășurare + 1 × țesătură	EST	—	—	—	—	—	—	—	—	0,60	0,65	0,70	0,70
	2 × înfășurare + 1 × țesătură	E2ST	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,75	0,80	0,80
	2 × țesătură	E2T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,75	0,80	0,80

TABELUL 3-11

Izolație cu hîrtie (clasă A). Conductoare rotunde (Extras din STAS 6363-76).

Tipul conductorului	Creșterea diametrului prin izolare $(d' - d)$ [mm]	Numărul și grosimea benzilor de hîrtie neimpregnate [mm]
Cu – H Al – H	0,20 ± 0,014	2 × 0,05
	0,26 ± 0,016	1 × 0,05 + 1 × 0,08
	0,30 ± 0,021	3 × 0,05
	0,32 ± 0,023	2 × 0,08
	0,32 ± 0,023	2 × 0,05 + 1 × 0,06
	0,36 ± 0,026	2 × 0,05 + 1 × 0,08
	0,40 ± 0,028	4 × 0,05
	0,42 ± 0,029	1 × 0,05 + 2 × 0,08
	0,44 ± 0,030	2 × 0,05 + 1 × 0,12
	0,46 ± 0,032	3 × 0,05 + 1 × 0,08
	0,48 ± 0,034	3 × 0,08
	0,50 ± 0,035	5 × 0,05
	0,54 ± 0,038	3 × 0,05 + 1 × 0,12
	0,56 ± 0,039	4 × 0,05 + 1 × 0,08
	0,60 ± 0,042	6 × 0,05
	0,64 ± 0,045	4 × 0,05 + 1 × 0,12
	0,64 ± 0,045	4 × 0,08
	0,66 ± 0,046	5 × 0,05 + 1 × 0,08
	0,70 ± 0,049	7 × 0,05
	0,74 ± 0,051	5 × 0,05 + 1 × 0,12
	0,76 ± 0,053	6 × 0,05 + 1 × 0,08
	0,78 ± 0,055	3 × 0,05 + 2 × 0,12
	0,80 ± 0,056	5 × 0,08
	0,84 ± 0,059	6 × 0,05 + 1 × 0,12
	0,86 ± 0,060	7 × 0,05 + 1 × 0,08
	0,94 ± 0,066	7 × 0,05 + 1 × 0,12
	0,96 ± 0,067	8 × 0,05 + 1 × 0,08
	0,96 ± 0,067	6 × 0,08
	0,96 ± 0,067	4 × 0,12
	0,98 ± 0,069	5 × 0,05 + 2 × 0,12
	1,44 ± 0,10	6 × 0,12
	1,92 ± 0,13	8 × 0,12
	3,12 ± 0,21	13 × 0,12
	3,20 ± 0,22	20 × 0,08
	4,32 ± 0,30	18 × 0,12
	4,80 ± 0,34	30 × 0,08

TABELUL 3-111

Izolaţie cu hârtie (clasă A). Conductoare profilate. (Extras din STAS 6163-78)

Tipul conductorului	Creşterea dimensiunilor prin izolare ($a' - a$; $b' - b$; $a_i - 2a'$; $b_i - b'$) [mm]	Numărul şi grosimea benzilor de hârtie, în mm	
		nesuprapuse	suprapuse
Cu – PH Al – PH Cu – 2 PH	0,28 ± 0,016	1 × 0,05 + 1 × 0,08	
	0,30 ± 0,021	3 × 0,05	
	0,32 ± 0,023	2 × 0,08	
	0,32 ± 0,023	2 × 0,05 + 1 × 0,08	
	0,36 ± 0,025	2 × 0,05 + 1 × 0,08	
	0,40 ± 0,028	4 × 0,05	
	0,42 ± 0,029	1 × 0,05 + 2 × 0,08	
	0,44 ± 0,030	2 × 0,05 + 1 × 0,12	
	0,46 ± 0,032	3 × 0,05 + 1 × 0,08	
	0,48 ± 0,034	3 × 0,08	
	0,50 ± 0,035	5 × 0,05	
	0,52 ± 0,036	2 × 0,05 + 2 × 0,08	
	0,54 ± 0,038	3 × 0,05 + 1 × 0,12	
	0,56 ± 0,039	4 × 0,05 + 1 × 0,08	
	0,60 ± 0,042	6 × 0,05	
	0,64 ± 0,045	4 × 0,08	
	0,64 ± 0,045	4 × 0,05 + 1 × 0,12	
	0,66 ± 0,046	5 × 0,05 + 1 × 0,08	
	0,70 ± 0,049	7 × 0,05	
	0,74 ± 0,051	5 × 0,05 + 1 × 0,12	
	0,76 ± 0,053	6 × 0,05 + 1 × 0,08	
	0,78 ± 0,055	3 × 0,05 + 2 × 0,12	
	0,80 ± 0,056	5 × 0,08	
	0,86 ± 0,060	7 × 0,05 + 1 × 0,08	
	0,96 ± 0,067	8 × 0,05 + 1 × 0,08	
	0,96 ± 0,067	6 × 0 ,08	
	0,98 ± 0,069	5 × 0,05 + 2 × 0,12	
	1,28 ± 0,090	8 × 0,08	
	1,44 ± 0,01	9 × 0,08	
	1,46 ± 0,10	5 × 0,05 + 4 × 0,12	
	1,70 ± 0,12	5 × 0,05 + 5 × 0,12	
	1,76 ± 0,13	11 × 0,08	
	1,92 ± 0,14	12 × 0,08	6 × 0,08
	1,94 ± 0,14	5 × 0,05 + 6 × 0,12	
	2,24 ± 0,15	14 × 0,08	7 × 0,08
	2,30 ± 0,16	15 × 0,05 + 5 × 0,08	
	2,70 ± 0,19	19 × 0,05 + 5 × 0,08	
	2,72 ± 0,19	17 × 0,08	8 × 0,08 + 1 × 0,08*
	3,04 ± 0,21	19 × 0,08	9 × 0,08 + 1 × 0,08*
	3,12 ± 0,21	13 × 0,12	
	3,36 ± 0,23		10 × 0,08
	3,52 ± 0,24		11 × 0,08
	3,84 ± 0,26		12 × 0,08
	4,00 ± 0,28		12 × 0,08 + 1 × 0,08*
	4,16 ± 0,29		13 × 0,08
	4,32 ± 0,30	18 × 0,12	
	4,80 ± 0,35		15 × 0,08
	4,96 ± 0,40		15 × 0,08 + 1 × 0,08*
	6,24 ± 0,50		19 × 0,08 + 1 × 0,08*

Tabela de magnetizare, pentru tola de transformator, laminată la rece cu cristale orientate cu grosimea de 0,28–0,35 mm şi $p_{10/50} = 0,45$ W/kg; H, A/cm.

B tesla	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0										
0,1										
0,2										
0,3										
0,4	0,073	0,0737	0,0744	0,0751	0,0758	0,0765	0,0772	0,0779	0,0786	0,0794
0,5	0,0802	0,081	0,0818	0,0826	0,0834	0,0842	0,0850	0,0858	0,0866	0,0874
0,6	0,0882	0,0891	0,0910	0,0910	0,0920	0,0930	0,0940	0,0950	0,0961	0,0972
0,7	0,0983	0,0994	0,1005	0,1016	0,1027	0,1038	0,1050	0,1062	0,1074	0,1086
0,8	0,1098	0,1110	0,1122	0,1135	0,1148	0,1161	0,1175	0,1190	0,1205	0,1220
0,9	0,1241	0,1260	0,1280	0,1300	0,1320	0,1340	0,1360	0,1380	0,1400	0,1420
1,0	0,1440	0,1460	0,1480	0,1500	0,1525	0,1550	0,1575	0,1600	0,1630	0,1660
1,1	0,169	0,172	0,176	0,180	0,184	0,188	0,192	0,196	0,200	0,204
1,2	0,208	0,213	0,218	0,223	0,229	0,235	0,241	0,248	0,255	0,262
1,3	0,269	0,276	0,284	0,292	0,301	0,310	0,320	0,330	0,340	0,351
1,4	0,362	0,374	0,387	0,400	0,418	0,438	0,458	0,480	0,508	0,538
1,5	0,569	0,600	0,635	0,670	0,710	0,760	0,820	0,890	0,970	1,060
1,6	0,6	1,27	1,38	1,51	1,68	1,85	2,00	2,30	2,60	2,95
1,7	3,38	3,90	4,40	4,90	5,50	6,10	6,70	7,40	8,10	9,80
1,8	11,5	13,0	15,0	17,0	19,5	22,0	26,0	29,0	34,0	39,0
1,9	46,0	55,0	68,6	84,0	100					

Tabela de magnetizare pentru tolă laminată la rece cu cristale neorientate, cu grosimea de 0,5 mm și $p_{1{,}0/50} = 2{,}3$ W/kg: H, A/cm.

B tesla	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	1,4	1,43	1,46	1,49	1,52	1,53	1,58	1,61	1,64	1,67
0,5	1,71	1,75	1,79	1,82	1,87	1,91	1,95	1,99	2,03	2,07
0,6	2,11	2,16	2,21	2,26	2,31	2,36	2,41	2,46	2,51	2,56
0,7	2,61	2,66	2,71	2,76	2,81	2,87	2,93	2,99	3,06	3,12
0,8	3,18	3,24	3,30	3,37	3,44	3,52	3,60	3,69	3,78	3,87
0,9	3,97	4,07	4,17	4,27	4,37	4,47	4,58	4,69	4,80	4,91
1,0	5,02	5,14	5,27	5,41	5,55	5,70	5,85	6,00	6,15	6,31
1,1	6,47	6,64	6,82	7,01	7,20	7,39	7,59	7,79	8,00	8,21
1,2	8,43	8,66	8,91	9,18	9,46	9,76	10,1	10,4	10,7	11,0
1,3	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	13,8	14,3	14,8	15,3
1,4	15,8	16,4	17,1	17,8	18,6	19,5	20,5	21,5	22,6	23,8
1,5	25,0	26,4	27,9	29,5	31,1	32,8	34,6	36,6	38,8	41,2
1,6	43,7	46,3	49,1	52,2	55,3	58,8	62,3	66	69,8	73,7
1,7	77,8	82,0	86,3	90,7	96,5	101	106	111	116	122
1,8	128	134	142	146	152	159	166	173	180	188
1,9	197	206	216	226	236	246	256	268	282	296
2,0	310	325	343	365	390	420	455	495	545	595
2,1	655	725	800	880	960	1 040	1 120	1 200	1 280	1 360
2,2	1 440	1 520	1 600	1 680	1 760	1 840	1 920	2 000	2 080	2 160
2,3	2 240	2 320	2 400	2 480	2 560	2 640	2 720	2 800	2 880	2 960
2,4	3 040	3 120	3 200	3 280	3 360	3 440	3 520	3 600	3 680	3 761
2,5	3 840	3 920	4 000	4 080	4 160	4 240	4 320	4 400	4 480	4 560

BIBLIOGRAFIE

1. JEZIERSKI, E.; GOGOLEVSKI, Z.; KOPCZYNSKI, K.; SZMIT, J.: *Transformatoare electrice. Construcție și proiectare.* Traducere din limba poloneză, adaptată și completată. Editura tehnică, București, 1966.
2. CIOC, I.; BICHIR, N.; CRISTEA, N.: *Mașini electrice. Îndrumar de proiectare vol. II.* Editura „Scrisul românesc", Craiova, 1981.
3. NICOLAIDE, A.: *Mașini electrice.* Teorie. Proiectare, vol. I. Editura „Scrisul românesc", Craiova, 1975.
4. BĂLĂ, C.: *Proiectarea mașinilor electrice.* Editura Didactică și Pedagogică, București 1967.
5. GHEORGHIU, I.; FRANSUA, AL.: *Tratat de mașini electrice, vol. II. Transformatoare.* Editura Academiei R.S.R., București, 1970.
6. RICHTER, R.: *Mașini electrice, vol. III.* Traducere din limba germană, Editura tehnică, București, 1960.
7. CIOC, I.; CATRINA, M.; CRISTEA, N.: *Mașini, utilaje și instalații din industria construcțiilor de mașini și aparate electrice. Manual pentru clasa a XI-a și a XII-a*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1978.
8. BICHIR, N.; RĂDUȚI, C.; DICULESCU, A.: *Mașini electrice.* Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
9. TIHOMIROV, P. M.: *Rascet transformatorov.* Energiia, Moskva, Leningrad, 1976.
10. ALEKSENKO, G. V.; AŠRJATOV, A. K.; FRID, E. S.: *Ispytanija vysokovoltnyh i moščnyh transformatorov, ciasti I.* Moskva-Leningrad, Gosudarstvenoe Energetičeskoe izdatel'stvo, 1962.
11. CÎRSTEA D.; AMBROZIE, C.; UDANGIU, GH.; TRUȚĂ, C.: *Încercarea transformatoarelor; II. Încercări funcționale.* Editura tehnică, București, 1967.
12. * * * STAS 1703/1...8-80.
13. * * * Aluminium foil transformer. Catalogul Fowels. Belgium, 1979.
14. MATHÉ, B.; COSTINA, D.; MARINESCU, A.: *Încercarea transformatoarelor; I. Încercarea izolației.* Editura tehnică, București, 1966.
15. FALLOU, BRIGITTE: Role d'additifs dans les fluides diélectriques pour transformateurs. In: Revue Générale de L'Electricité, nr. 9, 1965, p. 715–718.
16. PANTEA, AL.: *Probe și verificări la transformatoare de putere.* Editura tehnică, București, 1983.
17. ANTIK, I. V.: O vybore uslovno položitel'nyh napravlenij i tokov pri analize raboty transformatorov, Elektricestvo, No. 11, 1985, p. 59–60.
18. MÜLLER, Y.: *Elektrische Maschinen. Grundlagen, Aufbau und Wirkungsweise*, VEB Verlag, Berlin, 1976.
19. CEDIGHIAN, S.: *Materiale magnetice. Îndreptar.* Editura tehnică, București, 1974.
20. NICOLAIDE, A.: O sistemnom podhode v prepodavanii elektrotehničeskih disciplin. Diskusii. In: Električestvo No. 7, 1987, p. 71–72.

Redactor : VASILE PREDESCU
Tehnoredactor : MARILENA LUNGULESCU

Bun de tipar : 10.VII.1989
Coli de tipar : 20,5
CRAIOVA, 1989

Intreprinderea poligrafică „Oltenia"
str. Mihai Viteazul nr. 4, Craiova
Comanda nr. 55



TE

SCRISUL ROMÂNESC

Lei 26

ISSN 973-38-0[illegible]1-X